

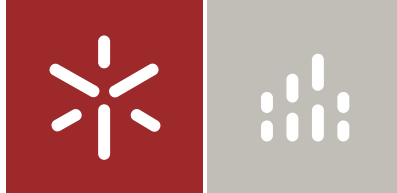


Universidade do Minho  
Escola de Arquitectura

Luís Carlos Barbosa Ferreira

Habitáculo reversível.  
Ligações através do uso de ferramentas digitais.





Universidade do Minho  
Escola de Arquitectura

Luís Carlos Barbosa Ferreira

Habitáculo reversível.  
Ligações através do uso de ferramentas digitais.

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Arquitectura  
Construção e Tecnologia

Trabalho efetuado sob a orientação de  
Professor Doutor Bruno Acácio Ferreira Figueiredo  
Professor Doutor Paulo Jorge Sousa Cruz

# Declaração

**Nome.** Luís Carlos Barbosa Ferreira

**Endereço eletrónico.** lferreira995@gmail.com

**Telefone.** 916297880

**Bilhete de indentidade / cartão de cidadão.** 14789552

**Título da tese.** Habitáculo reversível.  
Ligações através do uso de ferramentas digitais.

**Equipa de orientação.**

Professor Doutor Bruno Acácio Ferreira Figueiredo

Professor Doutor Paulo Jorge Sousa Cruz

**Ano de conclusão.** 2019

**Mestrado em Arquitetura**

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho,

**Assinatura.**





# Agradecimentos

Um primeiro agradecimento especial aos orientadores desta tese, Professor Bruno Figueiredo e Professor Paulo Cruz pela orientação, apoio, pelo entusiasmo e pela disponibilidade manifestada ao longo deste processo.

Ao Moreira e à Tatiana, pela amizade, pelos momentos de boa disposição que tanto ajudaram e pelo apoio durante este percurso e em especial durante este ano.

Ao Rafael pelas boas memórias, pela descontração e boa disposição durante o curso intensivo de arquitetura. À Sara pela amizade e apoio de sempre.

Ao Samuel, ao Carvalho e ao Ribeiro pela amizade e pelo apoio técnico fornecido sempre com qualidade.

Aos meus pais e ao Nuno por todo o afeto, motivação e compreensão de sempre.

Obrigado à Ana por todo o apoio, pelas horas divididas, por todos os bons momentos, pela presença que sempre acalma, pelo passado e também pelo futuro.

Obrigado!



# Resumo

O projetar, tendo como ferramentas auxiliares, processos computacionais e de fabrico digital, abre novas perspectivas para possibilidades de adaptabilidade e personalização em arquitetura. Esta associação pode contribuir para uma nova visão das técnicas tradicionais. Um desenvolvimento que deve chegar até ao utilizador comum, não especializado, que pode desenhar e construir num curto espaço de tempo e com recursos limitados um abrigo ou um habitáculo. Prevê-se a possível utilização em situações como desastres naturais ou situações de necessidade de construção imediata. Para além deste carácter de resposta à necessidade, também se elabora uma construção reversível para uma possível reutilização de elementos.

Esta investigação tem como objetivo um estudo e exploração da aplicação de ferramentas digitais na construção de um habitáculo. Para isso, desenvolveu-se um conjunto de modelos computacionais que auxiliam o desenho e fabrico de módulos habitacionais para situações de “necessidade” e “emergência”. O modelo computacional tem ainda o intuito de dar ao utilizador, ou habitante, algum grau de liberdade formal e dimensional, ou seja, permitir um controlo e apoio na personalização e na adaptabilidade de cada obra.

Estes módulos (habitáculos) constroem-se sob grelhas regulares, a partir das quais se desenvolvem pórticos articulados por ligações de carácter reversível. Estes módulos podem ser personalizados e adaptados em certos elementos como a cobertura inclinada ou não, o tipo de ligação e não só, mas também dimensões como largura, comprimento e altura, sendo que também será possível agrupar diferentes módulos para obter resultados diferentes. Prevê-se uma utilização reduzida de recursos para a sua concretização. Tomou-se como inspiração o movimento Maker, que tem por base a ideia de que o utilizador comum pode fabricar ou modificar qualquer tipo de objeto com as próprias mãos. Ao mesmo tempo, iniciativas como os FabLab, funcionam como espaço onde se pode ter acesso a máquinas de fabrico digital e ao mesmo tempo funcionar como lugares de partilha de informação ao utilizador comum.

É pretendido como elemento final da investigação o projeto e a fabricação de um conjunto de três pórticos, onde em cada um deles será explorado um tipo de ligação. Estes tipos de ligação baseiam-se em diferentes materiais, a madeira, o plástico e o metal, onde em cada um deles é explorado um método de produção diferente. Isto é, na madeira pretende-se o uso da fresagem como emulação da mão do mestre carpinteiro, no plástico o uso de fabrico aditivo que permite uma reprodução exata, rápida e quase sem desperdício do modelo, e o metal, através da quinagem de chapa, baseada na planificação da ligação pretendida.

**Palavras-Chave.** Adaptabilidade; Código; Fabrico digital; Ligações; Personalização.



# Abstract

Designing, with auxiliary tools, computational processes and digital manufacturing, opens new perspectives for possibilities of adaptability and customization in architecture. This association can contribute to a new vision of traditional techniques. A development that should reach the ordinary, non-specialized user who can design and build a shelter or a compartment in a short time and with limited resources. It is foreseen the possible use in situations like natural disasters or situations of necessity of immediate construction. In addition to this character of response to the need, a reversible construction is also elaborated for a possible reuse of elements, in the presence of limited resources.

This research aims to study and explore the application of digital tools in the construction of a passenger compartment. For this, a set of computational models was developed that help design and manufacture housing modules for “need” and “emergency” situations. The computational model also has the intention to give the user, or inhabitant, some degree of formal and dimensional freedom, that is, to allow a control and support in the personalization and adaptability of each work.

These modules (habitacles) are built under regular grilles, from which articulated porticos are developed by connections of reversible character. These modules can be customized and adapted to certain elements such as inclined or not, the type of connection and not only, but also dimensions such as width, length and height, and it will also be possible to group different modules for different results. Reduced use of resources is expected to be achieved. The project was inspired by the Maker movement, the idea that the average user can make or modify any type of object with his own hands. At the same time, initiatives such as the FabLab, function as a space where digital manufacturing machines can be accessed and at the same time function as information sharing places and are expected to operate as a method of access to the common user.

It is intended as the final element of the investigation the design and manufacture of a set of three porticos, where in each one of them will be explored a type of connection. These types of bonding are based on different materials, wood, plastic and metal, where in each of them a different production method is explored. That is, in wood is intended the use of milling as emulation of the master carpenter's hand, in the plastic the use of manufacturing additive which allows an exact, fast and almost no wastage reproduction of the model, and the metal, through the metal bending, based on the planning of the intended connection.

**Key words.** Adaptability; Code; Digital manufacture; Connections; Customization.



# Índice

## 1. Introdução. 001

- 1.1. Tema e problemática. 003
- 1.1. Objetivos e considerações gerais. 005
- 1.2. Organização da tese. 006

## 2. Contextualização. 009

- 2.1. Premissas para um habitáculo. 011
  - 2.1.1. *Existenziminimum*. 012
  - 2.1.2. Adaptabilidade e personalização. 013
  - 2.1.3. Sistemas de projeto. 015
  - 2.1.4. O reutilizar de matérias. 016
- 2.2. Sistemas de ligação. 017
  - 2.2.1. Madeira. 018
  - 2.2.2. Plástico. 019
  - 2.2.3. Metal. 020
- 2.3. Desenho paramétrico. 021
- 2.4. *Digital Master Builder*. 023

## 3. Sistemas para fabrico digital. 027

- 3.1. Esqueleto de projeto. 029
  - 3.1.1. Definição geral. 030
  - 3.1.2. Código. 032
- 3.2. Sistemas de Ligações. 037
  - 3.2.1. Madeira. 039
    - 3.2.1.A Pinos. 041
      - 3.2.1.A.I Definição da ligação. 042
      - 3.2.1.A.II Código, aplicação aos pontos. 043
      - 3.2.1.A.III Prototipagem. 046
    - 3.2.2.B 2half. 049
      - 3.2.2.B.I Definição da ligação. 050
      - 3.2.2.B.II Código, aplicação aos pontos. 051
      - 3.2.2.B.III Prototipagem. 053
    - 3.2.3.C Roof. 055
      - 3.2.3.C.I Definição da ligação. 056
      - 3.2.3.C.II Código, aplicação aos pontos. 057
      - 3.2.3.C.III Prototipagem. 059
    - 3.2.4.D Lock joint. 061
      - 3.2.4.D.I Definição da ligação. 062



- 3.2.2 Plástico. 063
  - 3.2.2.A Node. 065
    - 3.2.2.A.I Definição da ligação. 066
    - 3.2.2.A.II Código, aplicação aos pontos. 067
    - 3.2.2.A.III Prototipagem. 070
- 3.2.3 Metal. 072
  - 3.2.3.A Planificação. 073
    - 3.2.3.A.I Definição da ligação. 074
    - 3.2.3.A.II Código, aplicação aos pontos. 076
    - 3.2.3.A.III Prototipagem. 078

#### **4. Proposta: três pórticos, três ligações. 079**

- 4.1. Processo de desenho, fabrico e construção. 081
- 4.2. Simulação de transporte e fabrico. 091

#### **5. Conclusão. 93**

- 5.1 Considerações finais. 095
- 5.2 Considerações futuras. 098

#### **6. Bibliografia. 099**

#### **7. Anexos. 103**

# Lista de figuras

- Figura 1.** Casa tipo *Existezminimum*.
- Figura 2.** Esquema exemplificativo da adaptabilidade.
- Figura 3.** Fotografia puxador, <http://repositoriodemateriais.pt>.
- Figura 4.** Fotografia porta, <http://repositoriodemateriais.pt>.
- Figura 5.** Entalhe de madeira.
- Figura 6.** Ligação de madeira, Laboratório SPACE10.
- Figura 7.** “Frameworks”, Studio Mieke Meijer.
- Figura 8.** “KEYSTONES”, Studio Minale.
- Figura 9.** Design of robotic Fabricated High Rises 1, SEC Singapore ETH Centre, 2012.
- Figura 10.** Fresadora CNC. Fotografia do autor.
- Figura 11.** Fresa, fotografia do autor.
- Figura 12.** Impressora CR-10, <https://www.azurefilm.com/creality-cr-10-3d-printer-review-september-2018>.
- Figura 13.** Fabrico aditivo. Fotografia do autor.
- Figura 14.** SLA, <https://www.3dnatives.com/en/stereolithography-explained100420174>.
- Figura 15.** SLS, <https://gigaom.com/2014/04/25/why-you-wont-see-a-laser-sintering-3d-printer-on-your-desk-anytime-soon>.
- Figura 16.** FabLab, Amesterdan, <https://waag.org/en/article/how-set-fab-lab>.
- Figura 17.** FabLab, fresadora, <https://waag.org/en/article/how-set-fab-lab>.
- Figura 18.** FabLab, fabrico aditivo, <https://www.madatech.org.il/en/what-is-a-fab-lab>.
- Figura 19.** Esquema axonométrico “eixos”.
- Figura 20.** Esquemas “pontos”.
- Figura 21.** Esquema “processo do código do ponto ao eixo”.
- Figura 22.** Variantes do código.
- Figura 23.** Amostra de soluções geradas a partir do sistema de projeto.
- Figura 24.** Código: pontos, eixos principais e composição do esqueleto do habitáculo.
- Figura 25.** Funcionamento da fresadora. Fotografia do autor.
- Figura 26.** Vista axonométrica da ligação 4 Pinos.
- Figura 27.** Esquema dimensões, “Part 1”, “Part 2”, “Part 3”.
- Figura 28.** Código: 4 Pinos, U e Π.
- Figura 29.** Esquema de desenvolvimento 4 Pinos, com base nas regras do código.
- Figura 30.** Esquema axonométrico de fabrico 4 Pinos.
- Figura 31.** Prototipagem 4 Pinos. Fotografia do autor.
- Figura 32.** Prototipagem U e Π. Fotografia de autor.
- Figura 33.** Esquema axonométrico de fabrico U e Π.
- Figura 34.** Vista axonométrica da ligação 2half.
- Figura 35.** Esquema dimensões, “Part 1”, “Part 2”, “Part 3”.
- Figura 36.** Esquema de desenvolvimento 2half, com base nas regras do código.
- Figura 37.** Prototipagem do componente 2. Fotografia do autor.

**Figura 38.** Esquema axonométrico de fabrico componente 2.  
**Figura 39.** Esquema axonométrico de fabrico componente 1.  
**Figura 40.** Prototipagem do componente 1. Fotografia do autor.  
**Figura 41.** Vista axonométrica da ligação Roof.  
**Figura 42.** Esquema dimensões, “Part 1”, “Part 2”, “Part 3”.  
**Figura 43.** Código: Roof.  
**Figura 44.** Esquema de desenvolvimento Roof, com base nas regras do código.  
**Figura 45.** Prototipagem Roof. Fotografia do autor.  
**Figura 46.** Esquema axonométrico de fabrico Roof.  
**Figura 47.** Vista axonométrica da ligação Lock joint.  
**Figura 48.** Elementos produzidos através de fabrico aditivo.  
**Figura 49.** Vista axonométrica da ligação Node.  
**Figura 50.** Esquema dimensões, “Part 1”, “Part 2”, “Part 3”.  
**Figura 51.** Esquema de desenvolvimento Node, com base nas regras do código.  
**Figura 52.** Frames de processo pré-prototipagem.  
**Figura 53.** Prototipagem Node. Fotografia do autor.  
**Figura 54.** Vista axonométrica da ligação Planificação.  
**Figura 55.** Planificação da ligação Planificação.  
**Figura 56.** Esquema de desenvolvimento Planificação, com base nas regras do código.  
**Figura 57.** Prototipagem Planificação. Fotografia do autor.  
**Figura 58.** À esquerda, a interface gráfica do *Rhinoceros*, apresenta a solução gerada em função dos parâmetros definidos em *Grasshopper*. À direita, a interface gráfica do *Grasshopper*, apresenta as variantes que definem o sistema de projeto do protótipo.  
**Figura 59.** As variantes que definem o sistema de projeto do protótipo.  
**Figura 60.** Elementos necessários ao projeto do protótipo.  
**Figura 61.** Processo de construção do protótipo final, segue a ordem crescente dos esquemas.  
**Figura 62.** Construção do protótipo final, escala 1:1. Segue a ordem crescente dos esquemas.  
**Figura 63.** Planta e cortes, esquema de transporte.

# Lista de siglas

- ABS.** *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (Acrilonitrila Butadieno Estireno)
- API.** *Application Programming Interface* (Interface de programação de aplicações)
- CAD.** *Computer Aided Design* (Desenho Assistido por Computador)
- CAM.** *Computer Aided Manufacturing* (Fabrico Assistido por Computador)
- CNC.** *Computer Numeric Control* (Controlo Numérico Computorizado)
- FFF.** *Fused Filament Fabrication* (Fabrico através de Filamento Fundido)
- IDEGUI.** Instituto de Design de Guimarães
- PLA.** *Polylactic Acid* (ácido polilático)
- SLA.** *Stereolithography* (estereolitografia)
- SLS.** *Selective Laser Sintering* (sinterização a laser)



# 1. Introdução



# 1.1 Tema e Problemática

Um interesse pelo modo como a arquitetura pode ajudar a dar respostas em contextos de necessidade emergente de habitação e, pelo gosto do desenho de detalhe de elementos de ligação, nomeadamente da carpintaria japonesa e de outros como “Frameworks”, do atelier Mieke Meijer, estão na origem da definição das temáticas que desenvolvem esta tese.

No percurso da investigação a arquitetura da necessidade, que engloba temas como a habitação temporária para situações como campos de refugiados ou resposta a catástrofes naturais, acaba por dar contexto para o desenvolver do projeto e do seu respetivo fabrico, através de ferramentas digitais. No entanto, não existiu oportunidade de aprofundar estes temas em situações ou contextos em que poderiam ser aplicados, e assim apenas definem as premissas do desenvolvimento do trabalho.

O desenvolver do módulo gerou-se a partir de certas premissas como o mínimo necessário, adaptabilidade, sistemas de projeto e o conceito “reversível” que servem de contextualização como pontos centrais do que se pensa como habitáculo. Existenzminimum, compreende a dimensão mínima considerada aceitável para o viver confortável do ser humano e, dos elementos considerados necessários à sua subsistência. A adaptabilidade, pretende que o módulo possa ser modificado ao longo do tempo, que possa responder a diferentes problemas e compreender diversas soluções de construção e a sua modificação. A premissa de sistemas de projeto reconhece diferentes modos já explorados para o desenho de habitações que tentavam responder de um modo semelhante, serve como base para o desenvolver de um sistema próprio de projeto. O “reversível”, uma temática que levanta a questão da reutilização de diversas partes do módulo, uma ideia em que não apenas os materiais possam ser modificados, mas sim que possam realmente ser usados novamente ou usados para modificar um outro módulo já existente.

Pretende-se que ao associar as premissas à ideia de módulo se desenhe um sistema de projeto, elaborado através de um sistema computacional, uma API (Interface de Programação de Aplicações) denominada Grasshopper. Um sistema de projeto que permite ao utilizador não especializado, desenhar e construir num curto espaço de tempo e com recursos limitados um habitáculo.



“As tecnologias digitais estão a mudar as práticas arquitetónicas de uma maneira que, há apenas uma década, poucos conseguiram prever. No campo conceptual, a arquitetura digital computacional de espaço geométrico topológico, não-euclidiano, sistemas cinéticos e dinâmicos e algoritmos genéticos suplementam a arquitetura tecnológica.”<sup>1</sup>

Com isto em mente, a presente investigação tem como tema o desenvolver de um módulo, através do estudo de ligações de carácter reversível, e do estudo de ferramentas de desenho e fabrico digital no projeto, com o objetivo do desenho e produção do módulo e dos seus componentes que seriam deste modo, personalizáveis, adaptáveis e passível de alterações.

O módulo, desenvolve-se sob grelhas regulares, a partir das quais se desenvolvem pórticos articulados por ligações de carácter reversível. Estes módulos podem ser personalizados e adaptados em certos elementos como a cobertura ou o tipo de ligação, e também dimensões como largura, comprimento e altura, sendo que também será possível agrupar diferentes módulos para obter resultados diferentes. Prevê-se uma utilização reduzida de recursos para a sua concretização. Tomou-se como inspiração o movimento Maker, que tem por base a ideia de que o utilizador comum pode fabricar ou modificar qualquer tipo de objeto com as próprias mãos. Ao mesmo tempo, iniciativas como os FabLab, funcionam como espaço onde se pode ter acesso a máquinas de fabrico digital e ao mesmo tempo funcionar como lugares de partilha de informação, prevê-se que possam operar como método de acesso ao utilizador comum.

É pretendido como elemento final da investigação o projeto e a fabricação de um conjunto de três pórticos, onde em cada um deles será explorado um tipo de ligação. Estes tipos de ligação baseiam-se em diferentes materiais, a madeira, o plástico e o metal, onde em cada um deles é explorado um método de produção diferente. Isto é, na madeira pretende-se o uso da fresagem como emulação da mão do mestre carpinteiro, no plástico o uso de fabrico aditivo que permite uma reprodução exata, rápida e quase sem desperdício do modelo, e o metal, através da quinagem de chapa, baseada na planificação da ligação pretendida.

Assim, este protótipo refletiria os elementos e ideias consideradas no desenvolver da investigação e consequentemente do módulo/habitáculo.

---

<sup>1</sup> “Digital technologies are changing architectural practices in ways that few were able to anticipate just a decade ago. In the conceptual realm, computational, digital architectures of topological, non-Euclidean geometric space, kinetic and dynamic systems, and genetic algorithms, are supplanting technological architectures.” Branko Kolarevic, in *Architecture In The Digital Age Design And Manufacturing*, Spon Press: New York, 2003, página 2.

## 1.2. Objetivos e considerações gerais

O interesse pelas tecnologias de fabrico digital e pelos métodos de ligação reversíveis, lançou a ideia de criar um modelo que permitisse desenhar módulos reversíveis e adaptáveis que se baseiam num tipo de ligação reversiva. Propõe-se o desenvolvimento de um módulo com as características anteriormente referidas, como resposta a arquitetura de necessidade ou a habitação de caris temporário.

Para tal, propõe-se o desenvolvimento de um sistema de projeto elaborado através do sistema computacional Grasshopper, em que se trabalham ligações que podem ser modificadas através deste sistema.

Com este intuito, propõe-se a exploração de três diferentes métodos de ligação, isto é, a exploração de três materiais que servem de base ao elemento ligação. Um primeiro, a madeira explora o modo em que o próprio material desenha a ligação, ao mesmo tempo que existe uma procura de simplificar a dificuldade da precisão dos cortes através de ferramentas de fabrico digital. A ligação por plástico é desenhado através de um software e produzido através de fabrico aditivo, o que conduz a um fabrico quase sem desperdício. Como terceiro material, o metal segue o estudo da planificação da ligação, sendo um tipo de ligação que poderá ser importante no caso de transporte, devido à espessura do material.

Com estas características o módulo pode, assim, responder a situações de caris temporário, local ou como apoio a desastres naturais.

Como proposta final da investigação pretende-se o projeto e a fabricação de um conjunto de três pórticos, onde em cada um deles será explorado um tipo de ligação, ou seja, cada um deles explora um tipo de material.

## 1.3. Organização da tese

O desenvolvimento desta tese é dividido em três fases.

Uma primeira fase, pelo estudo e levantamento de diversos tipos de juntas baseadas, principalmente, na carpintaria nipônica, focam juntas com uma ligação que pode ser revertida e, que permite assim reutilizar qualquer elemento ou substituí-lo facilmente. Foram também recolhidos exemplos da utilização de materiais como o PLA, bem como aqueles que podem ser adaptados ao metal, para a utilização neste tipo de construção.

Uma segunda fase, passa pelo desenvolvimento de um código que funciona em dois níveis, através da utilização do grasshopper. O primeiro nível desenvolve e controla a junta. O segundo nível gera um conjunto de elementos (vigas e pilares) que em conjunto com o primeiro nível, se traduz no módulo. O grasshopper permite que estes elementos possam ser controlados e variados através de uma listagem de condicionantes.

Por último, no conjunto dos dados obtidos na pesquisa e no código, desenvolve-se a construção de um protótipo onde serão explorados diferentes tipos de nós, focando em três tipos distintos, sendo um deles sem elementos externos, apenas o próprio material, à luz da carpintaria nipônica. Os outros dois utilizam um elemento externo como o PLA e o metal, ainda que reversível, podendo assim demonstrar o seu intuito e a sua resistência.

Os capítulos desta tese definem-se por:

O capítulo 1, divide-se em primeiro lugar, por 1. Introdução, onde se enquadra e se apresenta a temática em estudo, seguido por 1.1. Tema, onde se sugerem as principais ideias de investigação. No subcapítulo 1.2. Objetivos e considerações gerais, apresentam-se os objetivos que se pretendem alcançar com a tese. Em 1.3. Organização da tese, encontra-se a organização de todo o trabalho.

O capítulo 2, define-se por apresentar conceitos e ideias que introduzem as questões da tese, sendo elas 2.1 Habitação, 2.2 Ligações, 2.3 Desenho paramétrico e 2.4 Fabrico. No subcapítulo 2.1 exploram-se temas como as dimensões mínimas de habitação, a adaptação da habitação ao longo do tempo, sistemas de construção que se baseia na agregação de elementos lineares e também a ideia de reutilizar as matérias e as ligações realizadas numa construção para outra. No subcapítulo 2.2 estudam-se exemplos de tipos de ligação segundo os três

tipos de material em estudo: madeira, plástico e metal. No subcapítulo 2.3, refere-se a uma breve explicação do que se define como desenho paramétrico, e também, como apresentação do software escolhido para a realização do código. No subcapítulo 2.4 analisam-se ferramentas que auxiliam na produção das ligações e também espaços que podem levar o fabrico das ligações às pessoas sem experiência ou sem meios para os adquirir.

O capítulo 3 aborda o esqueleto estrutural 3.1, as ligações 3.2, e a gramática do módulo 3.3. Os subcapítulos 3.1 e 3.2 focam-se na definição, no desenho e desenvolvimento do código, sendo que em 3.2 também se explora a prototipagem das diferentes ligações. Cada um destes pontos em 3.2 é explorado nos três tipos de ligações, ou seja, nas ligações de madeira, na ligação de plástico e também na ligação de metal. O subcapítulo 3.4 condensa a gramática que foi usada no desenvolvimento do pensamento do código.

O capítulo 4, documenta a realização de um protótipo, que aborda a construção de um conjunto de três pórticos, onde em 4.1 cada um dos pórticos é explorado um dos três diferentes tipos de ligação. No subcapítulo 4.2 simula-se uma possível construção de um módulo onde se quantifica peças necessárias e respetivos tempos de produção.

O capítulo 5, como conclusão explica o que se obteve com o trabalho, bem como o que se espera para o futuro desenvolvimento deste tema.



## 2. Contextualização

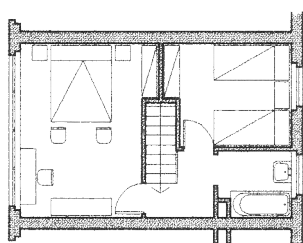


## 2.1 Premissas de um habitáculo

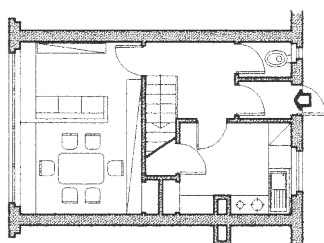
Neste subcapítulo, define-se as premissas que desenvolvem a ideia desta tese. *Existenziminimum*, onde se percebem noções do espaço mínimo para a subsistência. Adaptabilidade e personalização que atuam sobre o sistema de projeto de modo a lhe atribuir competências específicas conforme a necessidade do utilizador. Sistemas de projeto, onde se expõem métodos de projeto para definição de habitações em massa e onde se podem perceber alguns dos princípios necessários para o desenvolver de um sistema próprio de projeto. O Reutilizar de Matérias é um dos conceitos principais ao introduzir a temática de reutilização de materiais, ou seja, partes de uma construção podem ser reapropriadas para uma outra construção.



## 2.1.1 *Existenzimum*



Primeiro piso



Piso térreo

Figura 1. Casa tipo “Existenzminimum” apresentado em Frankfurt, em 1929 por Alexander Klein. Com uma área interior de 64 m<sup>2</sup>.

Uma necessidade de construção urgente pós a Primeira Guerra Mundial despertou uma procura e desenvolvimento de novos tipos de habitação, ao mesmo tempo que se tentam manter os requisitos mínimos, *Existenzminimum*, e manter os custos de construção baixos.

Alexander Klein, um arquiteto que trabalhou entre 1920 e 1930, em Berlim, explorou o conceito *Existenzminimum*, um conceito que tem por base o mínimo de espaço necessário para o ser humano desenvolver as suas funções vitais, a casa mínima. O arquiteto acrescentou ainda a este conceito, objetivos psicológicos que também devem ser considerados nas funções vitais, “devemos ter em mente a influência dos sintomas de fadiga psicológica que influencia negativamente o sistema nervoso do homem, causado por sentimentos desagradáveis gerados por uma disposição accidental dos elementos do plano”<sup>2</sup>. Por “disposição accidental dos elementos do plano” entende-se os elementos que constroem o espaço interior de uma habitação.

Klein estabeleceu o problema da habitação ao considerar parâmetros para avaliar os efeitos psicológicos sobre o ser humano, assim pensou as dimensões da habitação, não através da dimensão dos seus espaços individuais, mas sim através do número de camas que cada habitação teria, ou seja, pensou a habitação para cada família. Deste modo, a unidade “cama” tornou-se a medida para o espaço necessário para os quartos, a sala, a cozinha e para a casa de banho. No desenvolver do seu método, os parâmetros considerados foram “*Betteffekt*”, a relação entre a área total construída e o número de camas; “*Nutzeffekt*”, a relação entre a área usada e a área total construída; “*Wohnereffekt*”, a relação entre a área da sala de estar, dos quartos e a área total construída.

Para além de Klein existiram outros arquitetos que exploraram as dimensões mínimas necessárias ao ser humano, como por exemplo, Le Corbusier com o conhecido “*Le Modulor*”, onde explora um sistema de proporções em torno da dimensão do corpo humano. Este último arquiteto utiliza as posições geralmente utilizadas pelo ser humano no quotidiano da habitação e através destas, define as proporções do espaço habitável.

O conceito *Existenzminimum*, como resposta a uma arquitetura de necessidade foi algo que interessou desde o início deste projeto. Deste modo, o desenvolvimento da investigação toma em conta o estudo de uma dimensão mínima necessária para o sistema de projeto do habitáculo.

<sup>2</sup> “we must keep in mind the influence of symptoms of psychological fatigue that negatively influences man’s nervous system, caused by unpleasant feelings generated by an accidental disposition of the elements of the plan”. M. G. Bevilacqua, “Alexander Klein and the *Existenzminimum*: A ‘Scientific’ Approach to Design Techniques”, in *Nexus Network Journal*, 13 no.2, 2011, p. 304

## 2.1.2 Adaptabilidade e personalização

O desenho de arquitetura adapta-se ao espaço, responde o tempo e ao lugar. Sendo assim, caracterizado pela sua adaptabilidade, não só se cinge por esta característica como também permite que o indivíduo a adapte a si, personalizando-a. Assim a adaptação e a personalização da obra permitem uma grande diversidade de respostas, tornando cada projeto único. É esta complexidade de projeto que responde a um processo que passa por ideia, projeto e lugar, estando assim no processo a vontade do indivíduo pela ideia, a materialidade pelo projeto e o espaço pelo lugar.

A pertinência da adaptabilidade da obra de arquitetura e da sua personalização cresce a cada dia que passa, desde a fase conceptual, ao projeto e mesmo nas diversas fases da construção. A adaptabilidade da obra permite moldar um projeto a diferentes situações, dimensões, formas, tipo de ligação ou materiais, isto é, uma obra num país temperado, por exemplo, não precisa das mesmas características que uma outra num país nórdico. No país temperado a obra deveria promover a ventilação ao invés do isolamento que seria necessário no país nórdico. Mesmo em casos não tão evidentes como o anterior, a adaptabilidade é necessária pela vontade individual que origina a personalização da obra. Em projetos que a proximidade física se sobrepõe, a personalização permite obras que em nada se assemelham entre si. Projetos com base em madeiras dispõem de uma tectónica completamente diferente daqueles que tem o betão por base, ou mesmo a simples escolha entre o uso de cobertura inclinada ou da cobertura plana pode moldar por completo o projeto. Deste modo, os materiais e mesmo o valor formal da obra teriam de ser diferentes, respeitar o lugar e as suas necessidades, assim como a vontade do indivíduo.

Com esta ideia subjacente, propõem-se que este tipo de adaptabilidade fosse suportado por um modelo computacional que permitisse controlar um conjunto de variantes, que ultrapassem a vontade individual e as necessidades do lugar, anteriormente referidas, e a partir dessas mesmas variantes desenhar o projeto. A partir destes desenhos e através da utilização de uma fresadora CNC ou até mesmo de uma impressora 3D, seria possível ter acesso às diferentes partes constituintes da obra para assim ser possível uma fácil construção da mesma. Há luz do que a “Wikihouse”<sup>3</sup> permite fazer, sendo esta uma plataforma online onde se podem partilhar ou descarregar projetos para

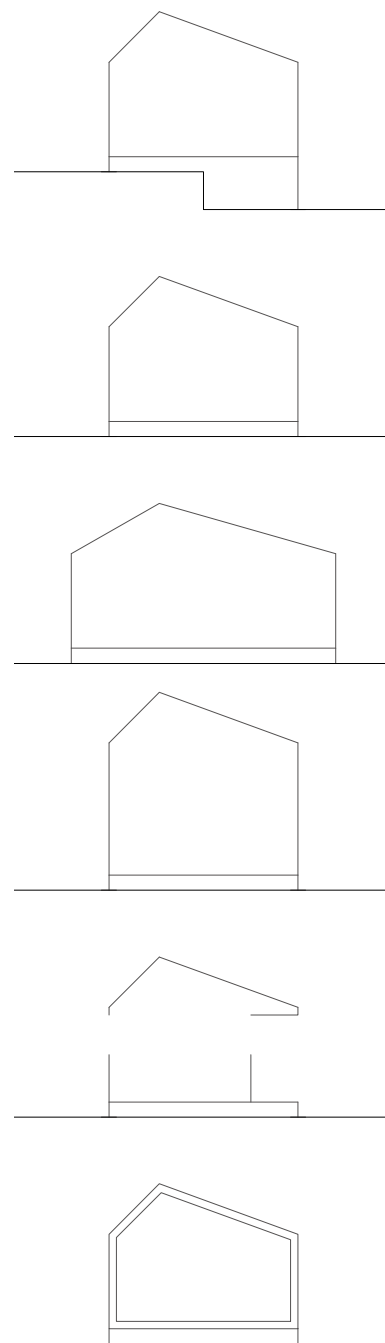


Figura 2. Esquema exemplificativo da adaptabilidade.

<sup>3</sup> <https://wikihouse.cc/>

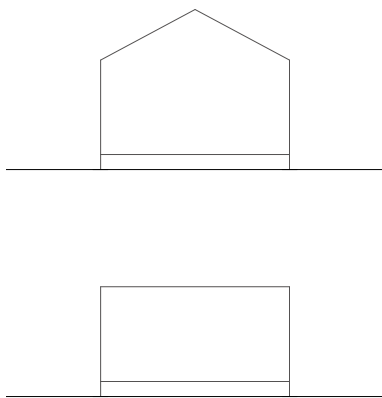


Figura 2. Esquema exemplificativo da adaptabilidade, continuação.

a construção de habitações, a partir dos elementos que a compõem, sendo que confia na utilização de uma CNC para o fabrico dos mesmos. No entanto, esta plataforma não permite projetar, serve apenas com um repositório de projetos. Propõe-se, deste modo a explorar a variante do projeto neste trabalho, sendo possível controlá-lo em diferentes escalas, o que não é praticável na “wikihouse”.

Com esta proposta, segue-se o raciocínio de Roberto Naboni e Ingrid Paoletti, quando abordam o conceito de personalização. “No contexto da arquitetura e da construção, o conceito de personalização implica um duplo significado” onde por um lado referem a necessidade de “procurar melhorar a qualidade e a originalidade da construção, o uso de ferramentas controladas digitalmente, sendo capaz de integrar pesquisas emergentes em tecnologias desenvolvidas”, e por outro lado, “aborda a necessidade de grandes decisões de construção a serem tomadas numa fase inicial da fase de conceção”, (in SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, 2009, página 2). Ou seja, uma preocupação com a personalização que se foca na qualidade dos elementos da construção e na originalidade do desenho, de uma procura pela integração de ferramentas digitais e da aplicação de técnicas experimentais, desenvolvidas recentemente e a sua aplicação a tecnologias correntes de forma a auxiliar na elaboração da mesma, por outro lado, este tipo de ideia promove um planeamento prévio à obra, o que permite um controlo de recursos e da qualidade dos mesmos.

## 2.1.3 Sistemas de projeto

Manuel Gausa desenvolve um sistema para projetar, ABC<sup>4</sup>. Sistema que nasce a partir do acrónimo das unidades funcionais usadas em projeto, “Armario, Baño e Coziña” (Armário, Casa de banho e Cozinha). Nunca chega a ser realizado, desde o momento em que foi criado para a competição de Ceuta em 1994. Destacou-se devido à sua abordagem inovadora que aplicava sistemas pré-fabricados a habitação em massa, ao mesmo tempo que dava ao usuário final a oportunidade de personalizar a habitação com elementos de série. Um sistema onde o projeto de habitação não é imposto pelo arquiteto, mas surge de um acordo. Seguem-se regras que pré-definem possíveis relações entre espaços funcionais e controlam proporções geométricas. Este sistema baseava-se na geração de apartamentos com um ou dois quartos, com várias configurações possíveis. Sendo que previa também a criação de uma “casca exterior” que refletiria o interior.

Mais tarde, Deborah Benrós desenvolve em parceria com José P. Duarte e Fernando Branco um conjunto de artigos científicos<sup>5</sup> que partem do tema desenvolvido por Manuel Gausa. Procuram desenvolver um sistema computacional para gerar habitação em massa, isto é, com o objetivo de fornecer moradias a um custo acessível com o recurso à produção em massa, seguindo a ideia de Manuel Gausa de garantir que estas sejam adaptadas aos seus usuários. Um conjunto de regras e a pré-fabricação integram-se através do desenvolvimento de uma ferramenta informática, para auxílio dos arquitetos nas várias etapas do processo de projetar habitação. Cria-se assim uma ferramenta que produz três elementos: modelos tridimensionais, desenhos de construção e uma lista de elementos de construção, podendo prever custos.

Com isto, propõe-se o desenho de um módulo que se pode adaptar e desenvolver em torno das preferências do utilizador. Este módulo poderia ser adaptado tendo em conta o seu modo de construção, as ligações, e num outro plano mais abrangente, podia ser redimensionado e repetido para obter novas formas.

---

<sup>4</sup> Jaime Salazar e Manuel Gausa, “*Singular housing. El dominio privado*”, Barcelona, 1999

<sup>5</sup> Deborah Benrós, José P Duarte e Fernando Branco, “*A System for Providing Customized Housing*”, in *International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures*, Sydney, 2007, p.153-166

## 2.1.4 O reutilizar de matérias

Reutilização direta é a reutilização de um elemento, produto, componente ou material para a mesma finalidade que a sua utilização inicial. Esta categoria inclui qualquer tipo de pequenas alterações feitas aos materiais para que estes continuem a desempenhar a sua função inicial (diferentes acabamentos, retoques e alterações no tamanho).

Com este propósito surge o “Repositório de Materiais”, um projeto que foi desenvolvido pela arquiteta Cláudia Cardoso, em parceria com o Parque de Ciências e Tecnologia da Universidade do Porto (UPTEC) e tem como espaço uma plataforma online. Este projeto tem como objetivo principal a reintrodução e valorização de materiais, em bom estado, em obras de construção, evitar assim o desperdício de matérias que apesar de em boas condições seriam considerados desperdícios. Esta é uma iniciativa especialmente direcionada para arquitetos, decoradores, designers de interiores, e também se direciona a empresas de construção, demolição e municípios em geral. Este projeto pretende desenvolver em conjunto com parcerias por parte de municípios e empresas uma Rede de Repositórios de Materiais de Construção. Começou no Norte, mas já dispõem de alguns parceiros e armazéns em Lisboa, sendo que pretende abranger todo o território nacional.

“Observa-se na sociedade atual uma cultura de desperdício, sendo o sector da construção um grande responsável na produção de resíduos. Procura-se encarar esta situação não como um problema, mas como uma oportunidade de mudança.”<sup>6</sup>

O “Repositório de Materiais” disponibiliza um catálogo online de peças que são mapeadas e é também registada a sua localização para que seja fácil a sua reutilização. Estão disponíveis na plataforma materiais como portas, portadas e janelas, materiais estruturais e de acabamento, gradeamentos, balaústres, fechaduras, dobradiças, maçanetas, puxadores e torneiras. Existem ainda equipamentos como bancadas e sanitários, azulejos, soletas de ardósia e telhas, bem como revestimento interior como soalho e elementos decorativos.

No desenvolvimento deste trabalho este tema foi considerado como central. Todas as ligações desenvolvem-se no sentido de poderem ser reutilizadas na sua totalidade, ou seja, sem a utilização de elementos como colas, um desenvolvimento à imagem da construção em junta seca.



Figura 3. Fotografia puxador, in <http://repositoriodemateriais.pt>.



Figura 4. Fotografia porta, in <http://repositoriodemateriais.pt>.

<sup>6</sup> Cláudia Cardoso, in <http://repositoriodemateriais.pt>, acedido a Outubro de 2018

## 2.2 Sistemas de ligações

Nesta tese estudam-se três tipos de ligações e usa-se um material diferente para construir cada uma das ligações. Cada uma das ligações passou por um processo de pesquisa, de definição formal (sistemas de encaixes) que se implementou em grasshopper, para otimização da modelação e posteriormente da sua fabricação.

Um primeiro material, madeira, na vertente da ligação entre duas ou mais diferentes peças sem necessitar de nenhum elemento externo de fixação, assegurando uma ligação concisa. São ligações cujo o desenho resulta de uma aprendizagem da carpintaria japonesa, onde o seu fabrico é materializado através da fresadora CNC.

O segundo material, o plástico (mais especificamente um polímero de poliácido láctico, conhecido como PLA), numa vertente de exploração da tecnologia de fabrico aditivo através de filamento fundido, FFF, propõe-se um nó de ligação, com a forma de um Rombicuboctaedro alterado que tenta responder a diversos tipos de ligações simultâneas, que se concentram num só ponto.

O terceiro material, o metal, que explora a possibilidade de uma ligação cujo desenho prevê o rebatimento das suas partes num único plano. Deste modo, permite-se que o seu fabrico se faça numa única folha de metal marcada e cortada através da fresadora CNC, sendo possível o transporte em grandes quantidades devido às pequenas dimensões e que na sua aplicação *in loco* se dobraria e sustentaria a ligação, envolveria os elementos a ser ligados e funcionaria como ligação.

Escolhem-se três matérias diferentes, com o intuito de explorar o desenvolvimento de três tipos diferentes de ligações, e simultaneamente das possibilidades que ferramentas de desenho paramétrico (Grasshopper) permitem introduzir ao processo de projeto, no âmbito deste trabalho. Uma primeira ligação que na sua essência é um encaixe de sobreposições, uma segunda que é um nó e uma terceira, a planificação, respondem a três métodos diferentes de unir. Três ligações e em cada uma delas um método de produção diferente. A fresadora CNC como processo subtrativo para desbaste da madeira, o FFF como processo aditivo de camadas de filamento polimérico, e novamente a fresadora CNC no metal, como ferramenta de corte e marcação/furação.

## 2.2.1 Madeira

Para a ligação de madeira foram estudadas as ligações usadas na carpintaria japonesa, ligações que são esculpidas a partir de um elemento de madeira como um barrote, que primam pela sua atenção ao detalhe e precisão.

Estudam-se ligações como “Igetashikuchi”, que se baseia na relação entre três elementos, um primeiro, vertical, que serve como receção aos outros dois e consiste em quatro paralelepípedos espaçados  $\frac{1}{3}$  da dimensão da peça entre si, seguido por dois “U” invertidos entre si e em direção perpendicular, segundo o eixo horizontal. “Tsūshin nettowāku setsuzoku” consiste na interseção de duas peças horizontais com um elemento vertical, sendo que os elementos horizontais dividem entre si a altura da ligação. Esta é reforçada pelo uso de dois pinos cilíndricos como método de travamento. “Ai-jauri” uma ligação mais simples apenas junta dois elementos iguais. Na divisão pela metade dos dois elementos, apenas travados por pinos, esta ligação é modificada com o intuito de permitir que a mesma possa ser adaptada tendo em conta inclinações entre os dois elementos.

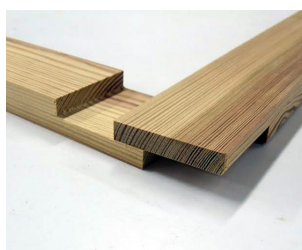


Figura 5. Entalhe de madeira.



Figura 6. Ligação de madeira, Laboratório SPACE 10.

Existe ainda, seguindo esta iniciativa, apesar de optar por um caminho diferente (figura 6), o Laboratório SPACE 10, ao serviço do IKEA, com o programa “Classical Techniques and 21st Century Tools”<sup>7</sup>, explorado por Yuan Chieh Yang, Benas Burdulis e Emil Froege. Este programa revisita métodos artesanais no trabalho de vários materiais, incluindo a madeira e o cobre, através de técnicas digitais. Consegue assim atingir um grande nível de precisão, sem os longos anos de prática do mestre artesão, podendo até em certos casos melhorar a peça em questão ao introduzir o corte através de uma CNC que lhes permite tanto cortar com linhas perfeitamente retas como incorporar curvas ligeiras em mais do que um ângulo e assim aumentar a qualidade do encaixe, atribuindo-lhe uma maior segurança e resistência.

<sup>7</sup> Space 10, “Classical Through Digital”, in <https://space10.io/classical-through-digital>, acedido a Março de 2018



## 2.2.2 Plástico

Na ligação Plástico foram estudadas ligações produzidas por fabrico aditivo polimérico.

Ateliers como o Studio Mieke Meijer e Studio Minale, que através do desenvolvimento e da aplicação de ligações mecânicas em conjunto com peças de madeira “standard”, conseguem produzir peças de mobiliário complexas ou simplificadas, dependendo da “ingenuidade” de cada um dos projetistas. Servem de inspiração para a realização de ligações em fabrico FFF.

### Studio Mieke Meijer

“Frameworks”, um sistema baseado em estruturas de rede, composto por várias partes que são posteriormente montadas seguindo formas triangulares com a visão de formar uma unidade resistente, são estruturas extremamente leves, construídas com um uso mínimo dos materiais. O sistema consiste em peças finas de carvalho ligadas por placas de aço e rebites, com uma possível adição de prateleiras de vidro que poderiam criar uma função de armazenamento, de natureza transparente, onde a leveza do projeto é reforçada. Segue um caráter funcional, esbelto e industrial, com opções que permitem criar soluções personalizadas.

### Studio Minale

“KEYSTONES” são ligações de fabrico aditivo, utilizam SLS, que lhes permite criar várias peças otimizadas e, assim, com uma simples adição de placas de madeira criar mobiliário. Peças estas que podem ser cortadas em tamanho e ângulos pré-determinados para acomodar uma maior variedade de formas que em conjunto com a sua peça criam ligações otimizadas para a resistência e o aproveitamento dos materiais.

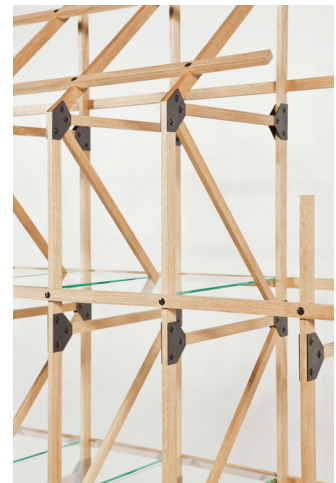


Figura 7. “Frameworks”, Studio Mieke Meijer.



Figura 8. “KEYSTONES”, Studio Minale.

<sup>8</sup> Cino Zucchi e Luisa Collina, in *Sempering: Process and Pattern in Architecture and Design*, Itália, 2016

<sup>9</sup> Studio Mieke Meijer, “Frameworks”, in <https://miekemeijer.com/frameworks>, acedido a Março de 2018

<sup>10</sup> Studio Minale, “Keystones”, in <https://www.minale-maeda.com/KEYSTONES>, acedido a Março de 2018



## 2.2.3 Metal



Figura 9. Design of Robotic Fabricated High Rises 1, SEC Singapore ETH Centre, 2012.

No contexto do Laboratório de Cidades Futuras da ETH Zurich, na unidade curricular de Arquitetura e Fabrico Digital, Fabio Gramazio e Matthias Kohler construíram um laboratório único para pesquisar os potenciais de processos robóticos na arquitetura e desenvolver cenários concretos para a sua aplicação em larga escala para a conceção e construção de arranha-céus em Singapura.

Neste contexto, um grupo de alunos percebeu o potencial da utilização de um robot para o fabrico de peças que apesar de idênticas podem ser modificadas. Através do modelo computacional desenvolvido em grasshopper, definem e controlam um robot que molda, por quinagem, diferentes formas a partir de folhas idênticas, seguidas de sua colocação e posicionamento num local específico, simulando o processo de construção de um edifício. O grupo utilizou, numa primeira instância, folhas de cartão, mas rapidamente alteraram o material para folhas de alumínio, já que estas oferecem um maior controlo na quinagem. Estes elementos poderiam ser quinados com ângulos diferentes e assim permite o fabrico de um grande número de possibilidades. As peças poderiam ser arranjadas em diferentes configurações, desde que se apoiassem sempre num elemento de cota diretamente inferior.<sup>11</sup>

Num princípio de ligação através da dobra ou quinagem de chapa metálica considerou-se o desenho de uma ligação que utilizasse este método de fabrico. Para tal, ponderou-se uma ligação produzida através da planificação, arranjo de polígonos de lados comuns para serem quinados e retornarem à forma que lhes deu origem. Deste modo, desenha-se uma ligação que se apresenta completa antes do seu fabrico, é planificada para ser fabricada e, mais tarde, quinada para realizar a sua função original de ligação.

---

<sup>11</sup> "Design of Robotic Fabricated High Rises - The High Rise Test Bed", in FCL Magazine, no.1 Singapura, 2013, p.13

## 2.3 Desenho Paramétrico

Desenho assistido por computador, DAC (em inglês, Computer Aided Design, CAD), é a nomenclatura atribuída a softwares utilizados em arquitetura, engenharia, design, entre outros como meio de facilitar o desenvolvimento de desenhos técnicos e de transferência de competências do desenho nos diferentes componentes, nas diferentes áreas de desenvolvimento necessário para a construção de um determinado projeto ou objeto.

“(...) os avanços no desenho assistido por computador (CAD) e tecnologias de fabrico assistido por computador (CAM) começaram a ter um impacto na construção de projetos e nas práticas de construção. Abriam novas oportunidades, permitindo a produção e a construção de formas muito complexas que foram, até recentemente, complicadas e dispendiosas para projetar, produzir e montar através do uso das tecnologias de construção tradicionais. Um novo *Continuum* digital, um link direto do projeto até a construção, é estabelecido através de tecnologias digitais.”<sup>12</sup>

Este tipo de software utiliza figuras geométricas como pontos, linhas e polígonos. Pode também desenvolver superfícies ou utilizar elementos tridimensionais gerados a partir de figuras geométricas (sólidos), como cubos, cilindros, cones ou pirâmides. Apresenta ferramentas que permitem a estes sólidos ou figuras interagirem entre si, por interseções, subtrações ou adições, por exemplo. Este tipo de software dispõem de definições mais específicas como, por exemplo, em aplicação à arquitetura, de paredes, lajes e outras estruturas que podem ser geradas automaticamente.

A generalidade de softwares DAC dispõem de editores de “script” (com funcionamento por linguagens de programação escrita ou visual) que permitem a implementação de desenho ou modelação paramétrica, para a geração de soluções de projeto de acordo com um conjunto de regras formais, geométricas e dimensionais pré-definidas.

---

<sup>12</sup> It is only within the last few years that the advances in computer-aided design (CAD) and computer-aided manufacturing (CAM) technologies have started to have an impact on building design and construction practices. They opened up new opportunities by allowing production and construction of very complex forms that were, until recently, very difficult and expensive to design, produce and assemble using traditional construction technologies. A new digital continuum, a direct link from design through to construction, is established through digital technologies. – Branko Kolarevic, in *Architecture In The Digital Age Design And Manufacturing*, Spon Press: New York, 2003, p. 2

Para o desenvolvimento desta tese foi adotado o uso do *Grasshopper*<sup>13</sup>, um software que funciona a par do *Rhinoceros 3D*<sup>14</sup> (software DAC) e que foi desenvolvido por David Rutten na empresa Robert McNeel & Associates. O software *Grasshopper* tem por base a programação, sendo esta desenvolvida de um modo visual. Através de um conjunto de componentes, que permite a compilação de funções e ações, tanto com a capacidade de gerar geometrias, como de estabelecimento de operações, estes componentes podem ser relacionados e interagir entre si de modo a desenvolver funções mais complexas.

Os usos mais avançados proporcionados pelo *Grasshopper* incluem o desenvolvimento de desenhos paramétricos para aplicação em projetos de arquitetura ou engenharia, bem como a análise e otimização do seu comportamento ou performance estrutural, térmica, acústica, etc. A fabricação destes elementos é feita através da aplicação de plugins (softwares externos ao *Grasshopper* que ajudam a complementar ou acrescentar certas funções ao mesmo). Este software pode ainda prever testes de forças, de sombreamento ou de iluminação.

---

<sup>13</sup> Grasshopper, <http://www.grasshopper3d.com>, acedido a Fevereiro de 2018

<sup>14</sup> McNeel's Rhinoceros, <http://www.rhino3d.com>, acedido a Fevereiro de 2018

## 2.4 Digital Master Builder

“Nos últimos anos uma ferramenta preponderante foi dada aos arquitetos. É a ferramenta das tecnologias de fabrico digital que permite converter rapidamente ideias digitais em elementos reais. Esta também permite o fabrico automatizado de componentes de construção em grande escala, diretamente dos modelos digitais. A possibilidade do fabrico digitalmente controlado significa que o arquiteto está tão perto da materialização como no processo original do ofício. Além disso, ganhou a precisão, o controle e a habilidade de explorar a complexidade que era previamente impossível. Como as ferramentas disponíveis se tornam cada vez mais sofisticadas, deve-se considerar que o papel dessas ferramentas não é apenas tornar os métodos de trabalho mais eficientes, mas contribuir para a ideia de criação arquitetónica.”<sup>15</sup>

Com o advento do fabrico digital o Arquiteto pode novamente tomar a posição de Master Builder. Assume novamente o controlo na projeção da obra, no fabrico dos materiais e na sua construção. Esta tecnologia permite que à medida que o arquiteto se torna familiarizado com a mesma, possa coordenar e transmitir com maior facilidade o que pretende ao construtor e ao fabricante. O arquiteto pode assim saltar intermediários e ele próprio produzir material em formatos indicados ao fabrico, podendo simplesmente controlar os dados que são fornecidos às máquinas de produção. Com esta estratégia os arquitetos “(...) conectam o software com o hardware, que organizam e traduzem dados do ambiente virtual para o físico. Ajudam os arquitetos a manter o controlo das intenções de projeto original. Finalmente, poderiam ser propostos como princípios para um arquiteto digital master builder.”<sup>16</sup>

Os arquitetos podem assim, à semelhança do artesanato tradicional, produzir com estas ferramentas o que idealizam. “Agindo quase como extensões das mãos do artesanato, o projeto e as ferramentas de fabrico digital criam uma curiosa tecnologia analógica de práticas artesanais pré-industriais”.<sup>17</sup>

---

<sup>15</sup>“In recent years a powerful outfit was given to architects. It is the outfit of digital fabrication technologies that allow to quickly convert digital ideas into real entities. It also enables automated fabrication of full-scale building components directly from digital information models. The advent of digitally controlled fabrication means that the architect is as close to the materialization as in the original craft process. Furthermore, he gained the precision, control and the ability to explore complexity which was previously impossible. As the available tools become more sophisticated, it must be considered that the role of such tools is not only to make working methods more efficient, but to contribute to the idea of architectural creation.” – Michał Górczyński e Jan Rabiej, “*Digital Master Builder: From 'Virtual' Conception to 'Actual' Production through Information Models*”, in *Respecting Fragile Places (29th eCAADe Conference Proceedings)*, Eslovénia, 2011, p. 412

<sup>16</sup>“These strategies connect software with hardware, they organize and translate data from virtual to physical environment. They help architects to maintain control of original design intentions. Finally, they could be proposed as principles for a digital master builder architect.” – Michał Górczyński e Jan Rabiej, “*Digital Master Builder: From 'Virtual' Conception to 'Actual' Production through Information Models*”, in *Respecting Fragile Places (29th eCAADe Conference Proceedings)*, Eslovénia, 2011, p. 418

<sup>17</sup>“Acting almost like prosthetic extensions of the hands of the artisan, digital design and fabrication tools are creating a curiously high-tech analog of preindustrial artisanal practices”. Mario Carpo, citado por Michał Górczyński e Jan Rabiej, “*Digital Master Builder: From 'Virtual' Conception to 'Actual' Production through Information Models*”, in *Respecting Fragile Places (29th eCAADe Conference Proceedings)*, Eslovénia, 2011, p. 419

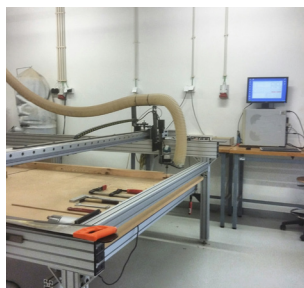


Figura 10. Fresadora CNC, fotografia do autor.



Figura 11. Fresa, fotografia do autor.



Figura 12. Impressora CR-10, <https://www.azurefilm.com/creality-cr-10-3d-printer-review-september-2018/>.

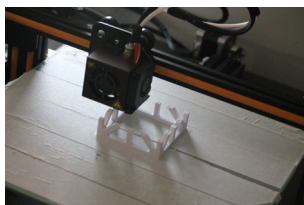


Figura 13. Fabrico aditivo, fotografia do autor.

Dentro destas ferramentas estudaram-se a Fresadora CNC e a máquinas de fabrico aditivo, vulgarmente conhecidas como impressoras 3D.

A Fresadora CNC<sup>18</sup>, é uma máquina que utiliza o Controlo Numérico Computadorizado (Computer Numerical Control) como método de funcionamento, ou seja, opera a partir de um computador, onde são controlados os seus movimentos. Esta ferramenta trabalha a partir da subtração de material, ou seja, parte de um material em bruto e, através de consecutivas passagens, retira material até apenas restar a forma pretendida para a peça. Para tal utiliza uma fresa como ferramenta de corte, sendo um objeto que trabalha através da rotação em torno de um eixo e consiste num conjunto de lâminas que permite a furação e o desbaste em movimento horizontal. Fornece um método de fabrico de modelos com diferentes escalas, para fins de estudo, protótipos, e para aplicação na construção em materiais como a madeira e o metal.

Assim para o fabrico, será necessário o desenho prévio da peça. Após a concretização do desenho será necessária a utilização de dois softwares, um primeiro que configura o código que dita os movimentos da máquina e um segundo que a partir do primeiro informa a máquina dos seus movimentos e o material necessário à produção da peça.

No código, elabora-se o percurso de corte da máquina, de acordo com as informações proporcionadas pelo utilizador. As dimensões da fresa, o número de passagens e a profundidade de cada corte são informações que, em coordenação com o desenho, indicam à máquina o seu movimento, sendo geralmente convertido em gcode ou txt.

No processo de fabrico, controlado pelo segundo software, será necessário, em primeiro lugar, encontrar o ponto zero da máquina. Este ponto indica ao software o ponto de ligação entre o desenho da peça e o material na fresadora. Após este ponto será necessário introduzir no software da máquina, as dimensões da fresa, velocidades e rotações indicadas para o tipo de material. Ainda é necessário introduzir a velocidade de cada passagem e o seu percurso convertido através do desenho da peça (gcode ou txt). Após estes pontos e da colocação do material onde irá ser realizado o desbaste, a máquina está pronta para o início da produção, sendo necessário o acompanhamento do fabrico da peça, para proteção e controlo da fresadora CNC.

Esta ferramenta introduz como vantagem, o aumento da produtividade, a otimização de cortes e movimentos, o que se traduz numa redução do tempo de produção, devido ao processo automatizado. Ao mesmo tempo, introduz uma precisão e repetição exata de cada peça. Por outro lado, devido à necessidade de operadores especializados, e ao processo de fabrico ser controlado pelo homem, existe ainda a possibilidade da introdução de erro. Introduz ainda um investimento inicial elevado e com manutenção que quando necessária, terá de ser realizada por mão de obra especializada.

O Fabrico aditivo<sup>19</sup> também conhecido como prototipagem rápida, é uma forma de tecnologia de fabricação aditiva onde um modelo tridimensional é criado por sucessivas camadas de material. Geralmente este tipo de máquina é caracterizada pela rapidez de produção de peças e pela reprodução de modo exato. A crescente comercialização deste equipamento resulta em equipamentos de custo acessível, o que contribui para a sua disseminação.

A máquina usada para o fabrico de peças no decorrer desta tese utiliza o tipo de fabrico através de um filamento fundido (FFF, Fused Filament Fabrication), ou seja, um processo de produção de objetos ou peças, através da reprodução de um modelo digital, por camadas de um material aquecido até ao ponto em que este se torna maleável e se funde à camada anteriormente aplicada, de modo a que o conjunto de

<sup>18</sup> Robert Aitcheson, Jonathan Friedman e Thomas Seebohm, "3-Axis CNC Milling in Architectural Design", in *International Journal of Architectural Computing* vol. 3, no. 2, p. 161-180

<sup>19</sup> Fabrico aditivo, in <https://www.3dhubs.com/3d-printing>, acessado a Fevereiro de 2018

camadas se torne num só elemento, isto é, a peça.

Existem ainda outros tipos de produção que são englobados no fabrico aditivo, como SLA, e SLS. SLA baseia-se na cura de uma resina sensível à luz, camada a camada, por meios de um laser. Este método é mais preciso que o FFF, mas introduz a dificuldade de trabalhar com elementos que necessitam de tratamentos pós produção para poderem ser utilizados. SLS, baseia-se na fusão de partículas de um material em pó por camadas. Este método é reconhecido pela rapidez de produção e por ser desnecessário o uso de suportes, já que a produção é realizada sobre o excedente de cada uma das camadas anteriores, aumentando assim a velocidade de produção.

Para a produção de peças, o primeiro passo será a modelação de um objeto através de um programa de modelagem tridimensional. De seguida, este modelo deve ser introduzido num outro programa, um slicer, que tal como o nome indica vai cortar o objeto em camadas correspondentes ao nível de detalhe pretendido pelo utilizador. Estas camadas serão ainda transformadas pelo programa em coordenadas e indicações de extrusão de material para que numa fase posterior a máquina compreenda como se mover e onde produzir cada camada do objeto. Este percurso é convertido num ficheiro gcode. Como último passo apenas é necessário introduzir este ficheiro gcode na máquina e iniciar a produção do objeto. É necessário considerar que cada máquina terá diferentes especificações quanto às diferentes espessuras de filamento, sendo que os filamentos comercializados têm dimensões entre os 1,75 e os 3 mm. Existem também filamentos flexíveis e filamentos compostos por vários materiais, pelo que será necessário ter em atenção se a máquina disponível permite a utilização deste tipo de filamentos.

Esta ferramenta introduz como vantagem, a personalização em massa, já que dado ao fácil acesso e ao meio de produção proporcionado por esta tecnologia, esta permite ao utilizador conceber, testar e melhorar o seu próprio objeto de uma forma simples e rápida. Devido ao seu método de produção, de sobreposição de camadas, os desperdícios são mínimos. Por outro lado, os conhecimentos necessários para a sua utilização necessitam de alguma aprendizagem. Apesar de existir fácil acesso às máquinas devido ao seu baixo valor económico, para grandes níveis de precisão ou velocidade, é necessário equipamentos de melhor qualidade e consequentemente de um valor económico superior, sendo que em qualquer um dos casos é necessário acompanhamento e manutenção contínua.

De modo a introduzir este tipo de ferramenta ao utilizador não especializado desenvolveram-se espaços como os FabLab<sup>20</sup> que se propõem-se a ser espaços dotados tanto de pessoal como de maquinarias especializadas. A funcionar para a promoção da cooperação, da criatividade, do empreendedorismo e do desenvolvimento da propriedade intelectual de cada indivíduo, estes espaços podem servir para disseminar este tipo de fabrico ao utilizador financeiramente frágil ou simplesmente que não tenha o conhecimento do modo de operação das máquinas. Um meio para aprender, ensinar e fazer chegar todo este desenvolvimento à população geral.

Fab lab (Fab de Fabricação, do inglês Fabrication + lab de laboratório, do inglês laboratory) é um espaço, como já referido, que se assemelha a uma oficina e oferece a possibilidade de fabricação na vertente pessoal.

Geralmente este tipo de oficinas estão equipadas com ferramentas e máquinas como fresadoras e máquinas de corte a laser, CNC, e máquinas de fabrico aditivo, o que permite um trabalho em diferentes escalas e materiais. O utilizador com este espaço pode usufruir equipa-

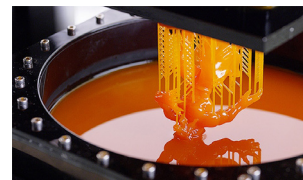


Figura 14. SLA, <https://www.3dnatives.com/en/sterolithography-explained100420174>

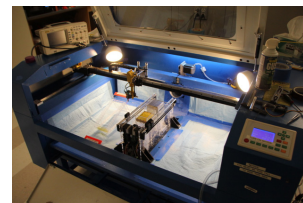


Figura 15. SLS, <https://gigaom.com/2014/04/25/why-you-wont-see-a-laser-sintering-3d-printer-on-your-desk-anytime-soon>.



Figura 16. FabLab Amesterdan, <https://waag.org/en/article/how-set-fab-lab>.



Figura 17. FabLab fresadora, <https://waag.org/en/article/how-set-fab-lab>.

<sup>20</sup> FabLab, in <http://www.fablabsportugal.pt>, acedido a Fevereiro de 2018



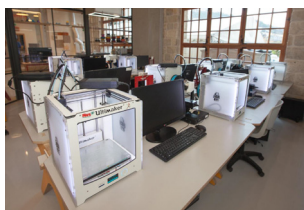


Figura 18. FabLab fabrica aditivo,  
<https://www.madatech.org.il/en/what-is-a-fab-lab>.

mentos que normalmente são excluídos devido ao seu elevado custo de aquisição e manutenção, mas que nestes espaços podem ser usados, de forma regrada e cuidada para segurança própria.

Focam-se maioritariamente na produção associada ao desenvolvimento próprio, na economia de uma escala reduzida, pelo que evitam a produção em massa, para se concentrar em chegar a um maior número de pessoas. Investem na formação e desenvolvimento de indivíduos para que estes possam desenvolver e criar por si, já que estes espaços funcionam com o movimento DIY (do it yourself, em português, faça-você-mesmo).

O movimento maker<sup>21</sup> promove o pensamento faça você mesmo, uma cultura que consiste na tentativa de solucionar problemas ou desenvolver novos elementos com base num trabalho pessoal, com as próprias mãos. Um estímulo à exploração da criatividade do utilizador comum para que desenvolva as suas próprias soluções.

É atribuído o crédito a Dale Dougherty como criador do movimento maker, na revista Make Magazine em 2005. Os participantes deste movimento são conhecidos como makers.

Deste modo na elaboração do elemento próprio, o master builder tem como auxílio estes espaços que lhes fornecem ferramentas e competências necessárias.

---

<sup>21</sup>Movimento maker, in <https://www.movimentomaker.pt>, acedido a Fevereiro de 2018

### **3. Sistema para fabrico digital**





## 3.1. Esqueleto de projeto

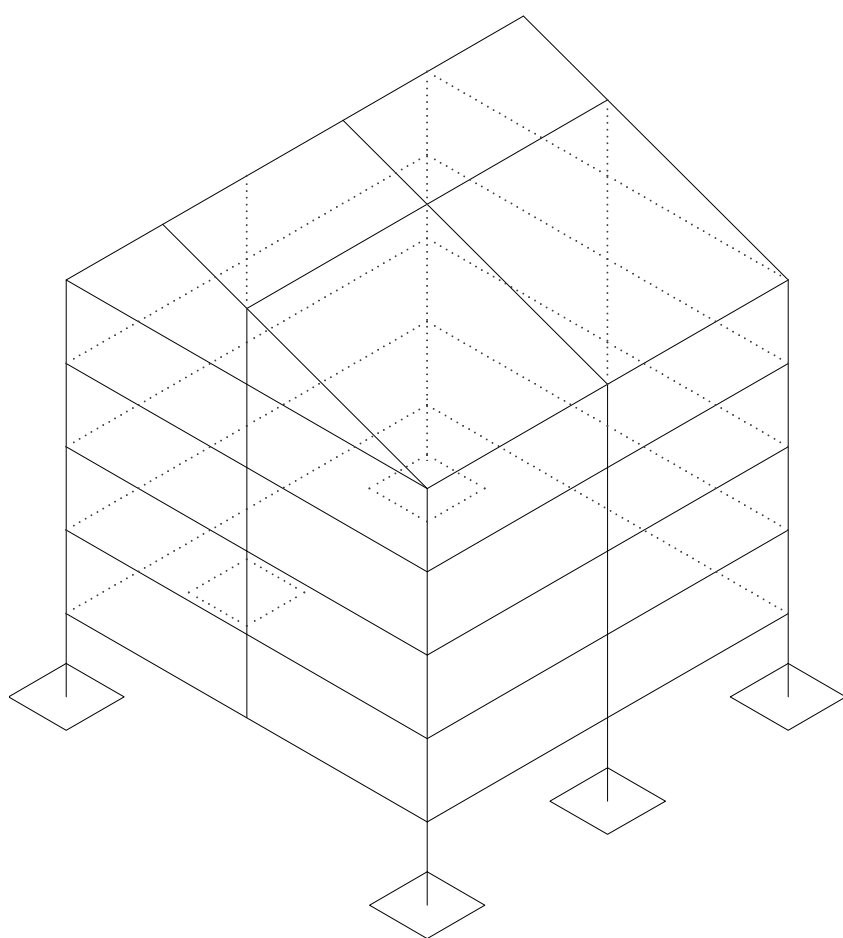


Figura 19. Esquema axométrico “eixos”.

## 3.1.1. Definição geral

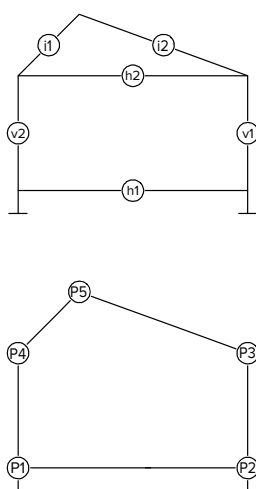


Figura 20. Esquemas “pontos”.

De modo a estabelecer uma lógica na elaboração deste modelo computacional, partiu-se da definição de uma grelha estrutural e dos elementos de ligação da mesma, isto é, uma composição de elementos que servem de base para a elaboração da obra. Assim, ainda seguindo a linha da adaptabilidade da arquitetura, estes dois elementos, a grelha estrutural e as ligações, sugerem duas escalas de adaptação na arquitetura.

O esqueleto, ilustra uma macro escala que consiste no desenho de eixos estruturais lineares. Estes eixos seguem a forma de pórtico, sendo este compreendido por dois eixos verticais (V1 e V2) e por dois eixos horizontais (H1 e H2) que são conformados por quatro pontos (P1, P2, P3 e P4), estes pontos servem de controlo de dimensões dos eixos e também como ligações entre eles, sendo que a exemplo, P1 e P2 ajustam o eixo horizontal inferior (H1) e servem de ligação do mesmo, com o eixo vertical 1 (V1) em P1 e com o eixo vertical 2 (V2) no ponto P2.

Certos fatores auxiliam na composição dos pórticos através dos eixos verticais, V1 e V2 e horizontais, H1 (altura pavimento) e H2 (altura da cobertura). Sendo que as dimensões e formas deste pórtico são condicionadas pelos parâmetros: Position, Ground clearance, Width, Hight, Number of porticos, Distance between porticos e também Angle left e Angle right. O ponto P1 indica a posição inicial, Position, determina através da sua localização relativa aos eixos X e Y, ou seja, ao mover o ponto P1 indica-se a localização do pórtico 1 e consequentemente os pórticos restantes e o modulo pelo seu conjunto. Ground clearance, controla a distância do pórtico ou conjunto de pórticos ao solo, agrega-se a H1 para proporcionar a altura do pavimento. Width determina a distância, segundo o eixo Y, entre o ponto P1 e o ponto P2, sendo que estes pontos são as extremidades do eixo H1, determinam o comprimento deste mesmo eixo e consequentemente a largura total do pórtico. O parâmetro Hight controla a distância entre o eixo H1 e H2, segundo o eixo Z, ao mesmo tempo que estabelece o comprimento dos eixos V1 e V2, já que estes ligam as extremidades de H1 e H2. Number of porticos, controla o número de vezes em que o Pórtico 1 é repetido, segundo o eixo X, determina assim o número total de pórticos presentes no módulo. Distance between pórticos aplica-se á distancia entre cada um dos diferentes pórticos, está condicionado segundo a dimensão 1,25 metros e dá comprimento aos eixos Dnm, eixos responsáveis pela ligação entre

diferentes pórticos, deste modo é um parâmetro que se relaciona com o parâmetro Number of porticos, sendo que juntos correspondem ao comprimento total do módulo, length. Uma outra variante, um conjunto de parâmetros, a ter em conta será, Angle left e Angle right, que se traduzem na inclinação ou não da cobertura. Na opção da utilização de uma cobertura plana, seriam utilizados para cada um dos pórticos, dois eixos verticais, V1 e V2, e dois eixos horizontais, H1 e H2. Na opção de cobertura inclinada serão utilizados dois eixos verticais, V1 e V2, bem como um eixo horizontal (H1) na parte inferior e um outro eixo horizontal (H2) correspondente à inclinação pretendida para a cobertura, sendo que neste caso, existirá uma divisão do eixo H2, o que dá origem ao ponto P5. Desenham-se assim, neste caso, ao ligar o ponto P4 ao ponto P5 o eixo inclinado 1, I1, sendo que ao mesmo tempo, ao ligar P3 e P5 desenha-se o eixo inclinado 2, I2. Estes dois novos eixos substituem o eixo horizontal 2, H2.

Deste modo, a adaptabilidade e a personalização dos eixos ilustra-se pelas diferentes variantes nesta escala macro. O esqueleto de projeto define-se por altura, largura, comprimento (número de pórticos e distância entre os mesmos) e pela inclinação ou pela não inclinação da cobertura, sendo que esta inclinação pode ser controlada de forma independente e assim adaptar-se de melhor forma ao espaço. Os eixos funcionam como esqueleto de toda a forma da obra, ajudam a compreender dimensões, desenvolver espaços e a determinar a localização dos elementos.

## 3.1.2 Código

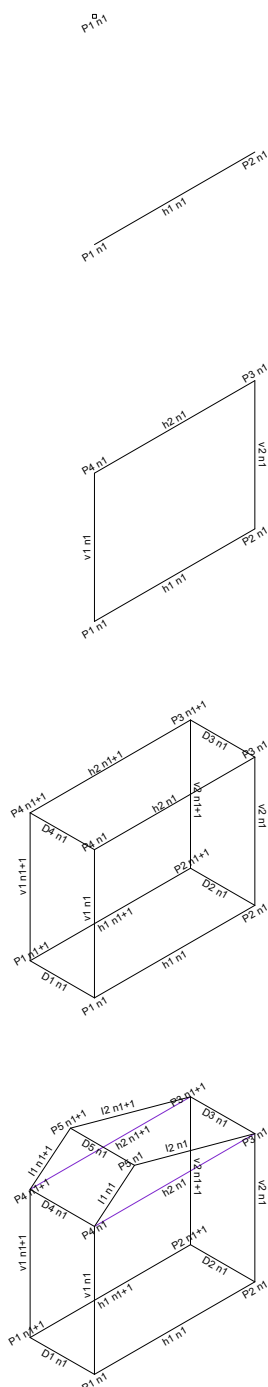


Figura 21. Esquema “processo do código do ponto e do eixo”.

De modo a desenvolver o projeto, começou-se pela identificação de um ponto ( $P1n1$ , sendo  $P1$  correspondente ao Ponto 1 e “ $n1$ ” correspondente ao número do pórtico, neste caso, pórtico número 1), que é definido pelas suas coordenadas cartesianas ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ). A localização deste ponto, ao representar o início de todo o modelo computacional, vem a definir o arranque do esqueleto e mais tarde da obra. A partir de  $P1n1$  e ao movimentá-lo no espaço, seguindo o eixo  $Y$ , através da variante *width* (com os valores, 2.50, 3.50, 5.00, 7.50 e 10.00 metros), este passa a ser denominado  $P2n1$ . Em seguida ao mover o ponto  $P1n1$  no eixo  $z$ , de acordo com o variante *height* (valores 2.00, 2.50, 3.00 e 3.50 metros) obtém-se o ponto  $P4n1$ , e ao aplicar o mesmo processo a  $P2n1$  obtém-se o ponto  $P3n1$ .

A partir dos pontos  $P1n1$  e  $P2n1$  determina-se um segmento de reta, o eixo horizontal 1 ( $H1n1$ ). Aos segmentos de reta determinados a partir de  $P1n1$  e  $P4n1$ ,  $P2n1$  e  $P3n1$  e também entre  $P3n1$  e  $P4n1$ , determina-se respetivamente eixo vertical 1 ( $V1n1$ ), eixo vertical 2 ( $V2n1$ ) e eixo horizontal 2 ( $H2n1$ ). Para permitir uma variação em  $H2nm$  (todos os eixos  $H2$ , sendo “ $m$ ” representante do número do pórtico), introduziu-se a possibilidade da introdução da variante *cobertura inclinada*. A partir de  $P3nm$  desenha-se uma reta com a variante, *Angle right* (segue os ângulos entre 0 e 45°, abertura à esquerda) sendo o ângulo aplicado a partir eixo  $H2$ . Do ponto  $P4nm$  desenha-se a uma reta com um ângulo que segue a variante *Angle left* (segue os ângulos entre 0 e 45°, abertura à direita) sendo que também esta se desenvolve a partir do eixo  $H2$ . Na interceção destas duas retas determina-se um novo ponto,  $P5nm$ . Assim a união de  $P4nm$  e  $P5nm$  resulta no segmento de reta correspondente ao eixo inclinado 1 ( $I1nm$ ), ao mesmo passo que ao unir  $P3nm$  e  $P5nm$  se obtém o segmento de reta correspondente ao eixo Inclinado 2 ( $I2nm$ ).

Ao conjunto composto por  $H1n1$ ,  $V1n1$ ,  $H2n1$  e  $V2n1$  dá-se a identificação de  $p1$ , ou seja, pórtico 1. Para se obter o pórtico 2 (passam a denominar-se,  $h1n2$ ,  $v1n2$ ,  $h2n2$  e  $v2n2$ ) move-se de forma paralela o pórtico 1, de acordo com a variante *distance between porticos* (valor fixo 1.25 metros), sendo que para obter um determinado número de pórticos se repete a tarefa através da variante *number of porticos* (compreendido entre 1 e 10).

Sendo que ao unir  $P1nm$  e  $P1nm+1$  se o eixo diagonal 1 ( $d1nm$ ),

ao repetir o mesmo processo em P2nm e P2nm+1, P3nm e P3nm+1, P4m e P4nm+1, e P5nm e P5nm+1 determinam-se respetivamente os eixos diagonais 2, 3, 4 e 5 (D2nm, D3nm, D4nm e D5nm). Sendo que a exemplo, ao unir os pontos P1n1 a P1n2 obtém-se o eixo diagonal 1 (d1n1), ao repetir o mesmo processo em P2n1 e P2n2, P3n1 e P3n2, P4n1 e P4n2, e P5n1 e P5n2 determinam-se respetivamente os eixos diagonais 2, 3, 4 e 5 (D2n1, D3n1, D4n1 e D5n1). Estes eixos unem os dois pórticos paralelos, p1 e p2.

À dimensão entre o pórtico 1 e ao último pórtico resultante da aplicação do fator number of porticos p1 e p1+m dá-se a nomenclatura de comprimento, length. Forma-se assim todo o conjunto de pórticos ao qual se atribui a terminologia Esqueleto de projeto (Ep).

Ao sintetizar a informação referida desenharam-se tabelas que explicitam este raciocínio. As primeiras duas tabelas apresentadas condensam o processo desenvolvido para a geração do esqueleto de projeto. As três tabelas seguintes introduzem a variante “Part Dimension”, que atribui volume aos elementos do esqueleto. Esta variante é compreendida por valores entre 60 mm e 100 mm, desenvolvidos de igual modo em torno dos eixos e das ligações. Assim, todas estas tabelas apresentam o processo do pensamento do código, sistema de projeto, ou seja, os elementos e o modo como estes foram gerados e agregados.

O elemento referido na coluna “Identificação” corresponde ao conjunto de elementos referidos na coluna “Constituintes”, que por sua vez se denomina em “Nomenclatura” pela respetiva designação.

Esqueleto de projeto					
Identificação	Constituintes			Nomenclatura	
P1nm	Coordenadas (X,Y,Z)			Ponto 1	
P2nm	P1nm	Width		Ponto 2	
P3nm	P2nm	Height		Ponto 3	
P4nm	P1nm	Height		Ponto 4	
H1nm	P1nm	P2nm		Eixo horizontal 1	
H2nm	P3nm	P4nm		Eixo horizontal 2	
V1nm	P1nm	P4nm		Eixo vertical 1	
V2nm	P2nm	P3nm		Eixo vertical 2	
I1nm	H2nm	<ângulo em P4		Eixo Inclinado 1	
I2nm	H2nm	>ângulo em P3		Eixo Inclinado 2	
P5nm	I1nm	I2 nm		Ponto 5	
pn	H1nm	V1nm	H2nm	V2nm	Pórtico n
pn+1	pn	d.b.p			Pórtico n+1
D1nm	P1nm	P1nm+1			Eixo diagonal 1
D2nm	P2nm	P2nm+1			Eixo diagonal 2
D3nm	P3nm	P3nm+1			Eixo diagonal 3
D4nm	P4nm	P4nm+1			Eixo diagonal 4
D5nm	P5nm	P5nm+1			Eixo diagonal 5
Ep	pn	d.b.p	n.p	Esqueleto de projeto	

P = ponto | n = pórtico | m = número do pórtico | H = eixo horizontal (eixo Y) | V = eixo vertical (eixo Z) | D = eixo lateral (eixo X) | I = plano inclinado | Beam = barrote de madeira (viga e pilar) | Node = ligação | d.b.p = distance between porticos | n.p = number of porticos | Pdim. = Part dimension | a.length = axis length

Subestrutura			
Identificação	Constituintes		Nomenclatura
psubH nm	BH nm	/ 1,00 metro	Pontos da subestrutura horizontal
psubV nm	Bv nm	/ 0,50 metros	Pontos da subestrutura vertical
Node3nm	psubH nm	psubH nm+1	Pilares da subestrutura
Node4nm	psubV nm	psubv nm+1	Vigas da subestrutura

Ligações			
Identificação	Constituintes		Nomenclatura
Node1nm	P1nm	Pdim.	Ligação 1
Node2nm	P2nm	Pdim.	Ligação 2
Node3nm	P3nm	Pdim.	Ligação 3
Node4nm	P4nm	Pdim.	Ligação 4
Node5nm	P5nm	Pdim.	Ligação 5

Beam				
Identificação	Constituintes			Nomenclatura
Beam 2nm	H1nm	Pdim.	a.lenght	Viga 1
Beam 4nm	H2nm	Pdim.	a.lenght	Viga 2
Beam 1nm	V1nm	Pdim.	a.lenght	Pilar 1
Beam 3nm	V2nm	Pdim.	a.lenght	Pilar 2
Beam I1nm	I1nm	Pdim.	a.lenght	Viga inclinada 1
Beam I2nm	I2nm	Pdim.	a.lenght	Viga inclinada 2
Beam 5nm	D1nm	Pdim.	a.lenght	Viga diagonal 1
Beam 6nm	D2nm	Pdim.	a.lenght	Viga diagonal 2
Beam 7nm	D3nm	Pdim.	a.lenght	Viga diagonal 3
Beam 8nm	D4nm	Pdim.	a.lenght	Viga diagonal 4
Beam 9nm	D5nm	Pdim.	a.lenght	Viga diagonal 5

Ligações + Beam				
Identificação	Constituintes			Nomenclatura
BH1	Node1nm	H1nm	Node2nm	Viga 1 com ligação
BH2	Node3nm	H2nm	Node4nm	Viga 2 com ligação
BI1	Node4nm	V1nm	Node5nm	Pilar 1 com ligação
BI2	Node3nm	V2nm	Node5nm	Pilar 2 com ligação
BV1	Node1nm	I1nm	Node4nm	Viga inclinada 1 com ligação
BV2	Node2nm	I2nm	Node3nm	Viga inclinada 2 com ligação
BD1	Node1nm	D1nm	Node1nm+1	Viga diagonal 1 com ligação
BD2	Node2nm	D2nm	Node2nm+1	Viga diagonal 2 com ligação
BD3	Node3nm	D3nm	Node3nm+1	Viga diagonal 3 com ligação
BD4	Node4nm	D4nm	Node4nm+1	Viga diagonal 4 com ligação
BD5	Node5nm	D5nm	Node5nm+1	Viga diagonal 5 com ligação

P = ponto | n = pórtico | m = número do pórtico | H = eixo horizontal (eixo Y) | V = eixo vertical (eixo Z) | D = eixo lateral (eixo X) | I = plano inclinado | Beam = barrote de madeira (viga e pilar) | Node = ligação | d.b.p = distance between porticos | n.p = number of porticos | Pdim. = Part dimension | a.lenght = axis lenght

Um conjunto de variantes encontra-se ao dispôr do utilizador e permitem gerar soluções variadas e únicas perante as escolhas de cada utilizador.

*Height* permite o controlo da altura do módulo e varia entre 2 e 3, 50 metros; *Width* permite o controlo da largura do módulo, varia entre 2 e os 10 metros. As variantes *Angle\_right* e *Angle\_left* são responsáveis pela inclinação da cobertura, sendo possível assim ter duas inclinações diferentes e varia entre 0°, apresentando uma cobertura plana e os 45°, uma cobertura inclinada. *Number of Porticos* define o número de vezes que o pórtico 1 se repete; *Distance Between Porticos* define a distância entre pórticos, sendo que esta variante se encontra definida a 1,25 metros, de modo a facilitar um futuro revestimento com placas osb. O conjunto das duas variantes anteriores, resulta no comprimento do módulo. *Type of joint* permite a escolha entre os três tipos de ligação: madeira, plástico e metal; *Part Dimension* permite a escolha da dimensão das ligações e da secção dos barrote; *Radius\_Pin's* define o raio das cavilhas de travamento no caso da ligação de madeira. Existem ainda as variantes *Ground Clearance* que é a distância do módulo ao solo e varia entre 0 e 1 metro; *Y e X from Starting Point* permitem controlar a localização do módulo. As dimensões das fundações também são possíveis de controlar pela sua largura, *Foundations width*, pelo seu comprimento, *Foundations lenght*, e pela sua altura, *Foundations hight*.

É possível com este tipo de variantes e a partir do sistema de projeto desenhar diferentes soluções, formas e interações de diferentes módulos, habitáculos. A possibilidade da interação e combinação de diferentes módulos permite o desenvolvimento de formas mais complexas e capazes de responder a questões para além da habitação. Estas formas podem desenhar espaços que permitem mais do que a vivência da necessidade e permitem desenvolver um carácter mais permanente, que pode incluir espaços de cariz público.

Estas propostas permitem validar as possibilidades que poderiam ser desenvolvidas com o sistema de projeto.

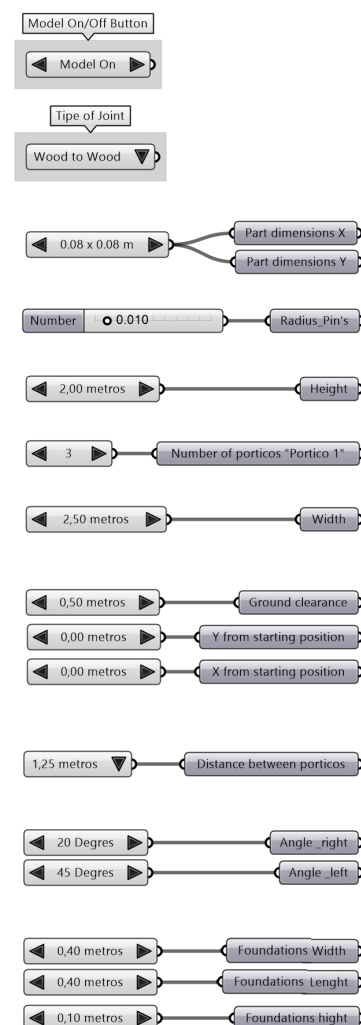


Figura 22. Variantes do código.

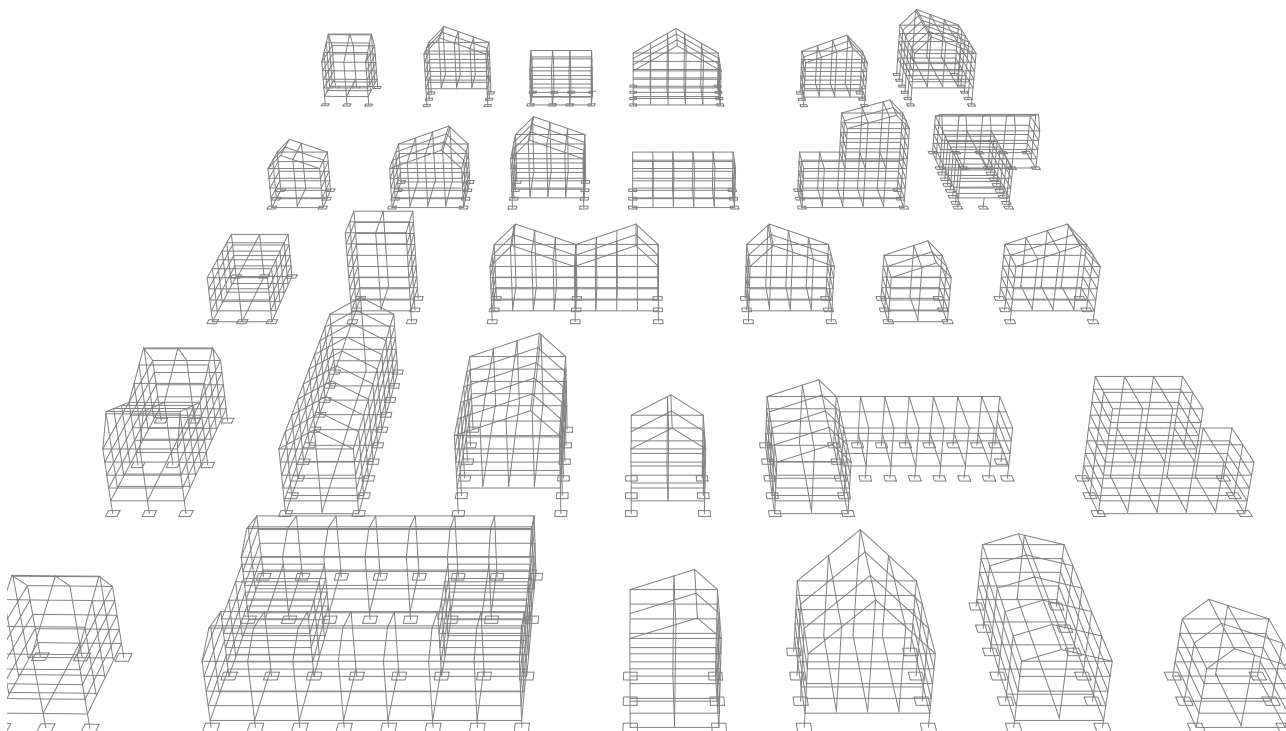


Figura 23. Amostra de soluções geradas a partir do sistema de projeto.



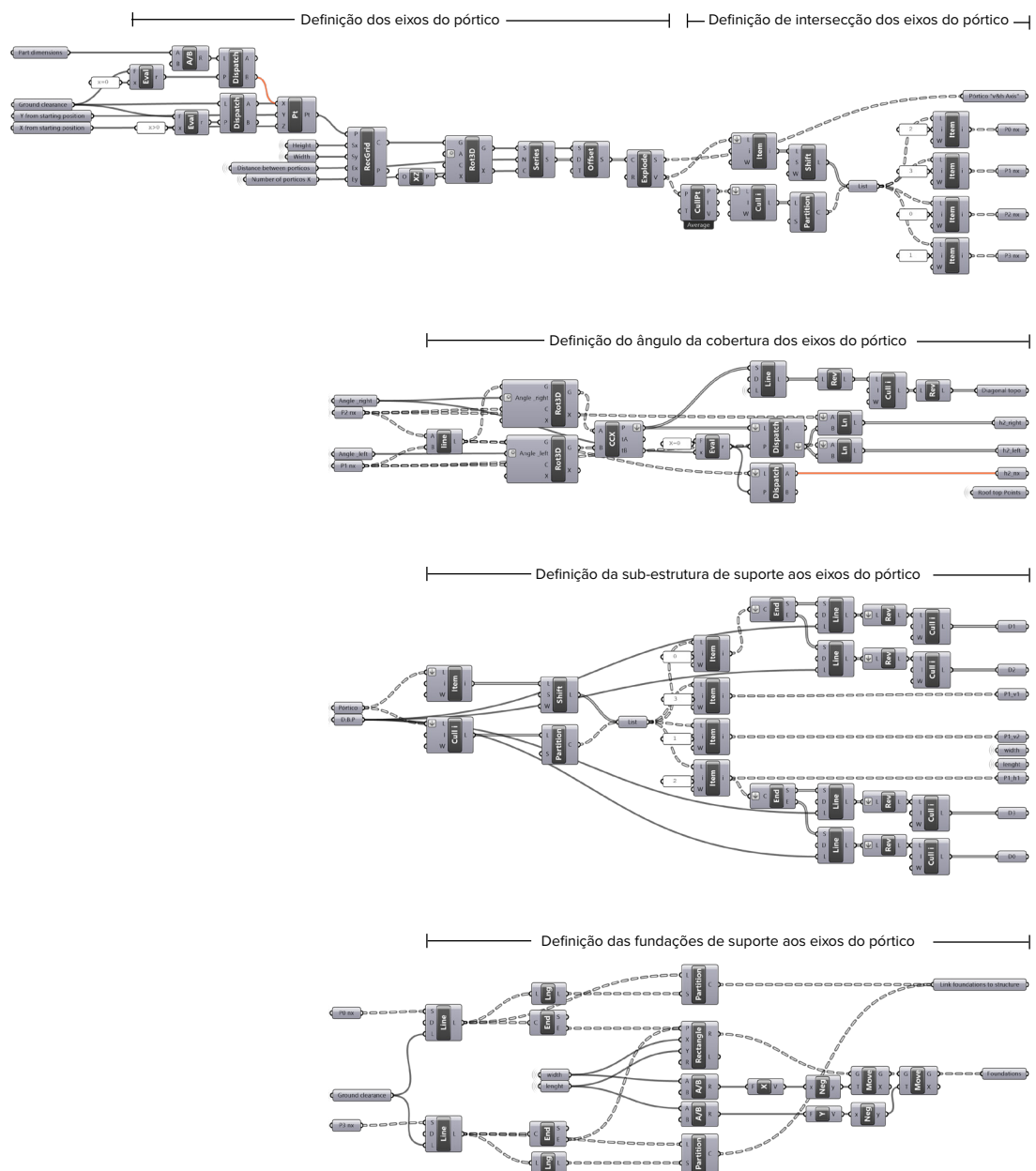


Figura 24. Código: pontos, eixos principais e composição do esqueleto do habitáculo.

## 3.2 Ligações

Como já referido, na elaboração do esqueleto de projeto está implícito a ligação dos eixos que o constituem. São estas ligações que introduzem a microescala, o tema que se desenvolve de seguida.

Da interceção dos eixos nascem pontos aos quais correspondem as ligações, ligações que mais tarde evoluem para ligações de junta seca, para isso optou-se pelo estudo de três diferentes tipos de ligação pela exploração de modos diferentes de produção, sendo eles subtração (juntas de madeira, através do uso da fresadora CNC), adição (junta em PLA, através do uso de uma impressora FFF, fabricação com filamento fundido) e por último, deformação (uma junta planificada, através do uso de uma folha de metal, cortada e vincada através do uso de uma fresadora CNC). Uma exploração das possibilidades de cada um destes tipos de ligação, pode a ligação em PLA pela sua adaptabilidade (por poder ser desenhada para um caso específico, ou como no exemplo projetado para a utilização em casos de ligações perpendiculares entre si ou mesmo no uso de um ligação que pode ter diferentes inclinações) e facilidade de fabrico, (no caso da existência de uma impressora FFF), já que a junta em madeira, pode apenas ser aplicada no tipo de ligação para que foi desenhada, mas complementa-se pela variedade de tipos de ligações que tem sido estudadas ao longo do tempo, por isso podem ser escolhidas e aplicadas apenas as mais corretas. Já a junta planificada, deformação, traz a vantagem do transporte pós fabrico, já que após o seu fabrico terá uma espessura que se assemelhará a uma folha de papel, tornando o seu transporte fácil.

Segundo esta ideia, desenvolveram-se três exemplos.

Uma primeira, com base na carpintaria tradicional japonesa, que se desenvolve com o recurso a cortes e entalhes que promovem ligações que não usam um material externo para realizar a ligação. É um tipo de ligação que confia no detalhe e perícia do carpinteiro. Dentro dos diferentes tipos de ligações desenvolvidas na carpintaria japonesa propõe-se o estudo destes quatro exemplos, 4 pinos, 2half, roof e lock joint, sendo que esta última não foi aplicada no modelo computacional.

Uma segunda ligação com base na tecnologia de FFF, utiliza PLA (Ácido Polilático) que é um polímero termoplástico derivado de recursos renováveis, e um filamento regularmente usado com material de impressão. Esta ligação parte da forma geométrica da esfera cunhada e que em secção apresenta uma figura octogonal. Usa encaixes por

fricção, apesar de reversíveis e consiste em três partes: a esfera cunhada, a tampa que recebe o barrote de madeira e o pino que une as duas últimas partes referidas.

A terceira ligação parte do conceito de planificação, a partir de uma folha de metal, que cortada e vincada através do uso de uma fresadora CNC pode ser aplicada a dois ou mais barrotes de madeira. Usa encaixe por fricção e funciona como um desdobrável através do vincar de arestas, formando uma figura tridimensional, o que a torna mais resistente.

## 3.2.1 Madeira

Junta de madeira, com esta ligação pretende-se uma ligação que não necessite de um segundo tipo de material para realizar a mesma, ou seja, é uma ligação que não precisa de peças ou partes de outros materiais que venham a reforçar ou facilitar esta ligação, mesmo sem materiais externos garante a sua viabilidade enquanto ligação.

Permite ao desprezar elementos de ligação (ligantes ou outros) como colas, uma reutilização de todos os elementos, do mesmo modo que a construção em junta seca. Como já referido, é um tipo de ligação que tem como fundações o detalhe e a perícia do carpinteiro, sendo que neste trabalho se explora a possibilidade do uso da fresadora CNC como colmatação da necessidade do mestre carpinteiro e como forma de introduzir este tipo de ligação ao utilizador comum.

Este género de ligações obtém-se pela subtração de partes da junta ao componente que faz parte da estrutura, ou seja, ao retirar a área de entalhe no elemento vertical, e ao reproduzir um mesmo processo no elemento horizontal, pode-se desenvolver assim uma ligação simples entre os dois. Uma ligação simples, mas efetiva, o que resulta numa ligação segura. Sugere-se ainda que esta possa ser melhorada com a adição de cavilhas (cilíndricas), que podem ser fabricadas a partir de excedentes dos elementos verticais ou horizontais, por exemplo.

Neste tipo de ligação foram estudados quatro exemplos que se aprofundarão de seguida. Estes exemplos foram baseados em ligações já existentes da carpintaria japonesa, que para este estudo sofreram alterações. São eles 4 pinos, 2half, roof e lock joint, baseados respetivamente em “Igetashikuchi”, “Tsūshin nettowāku setsuzoku”, “Ai-jauri” e “Kai no kuchi tsugi”, sendo que este último não foi aplicado no modelo computacional e foi já estudado pelo arquiteto taiwanês Yuan Chieh Yang a convite do IKEA's Space 10 Lab, visto o seu interesse na carpintaria tradicional japonesa e no uso da fresadora CNC.

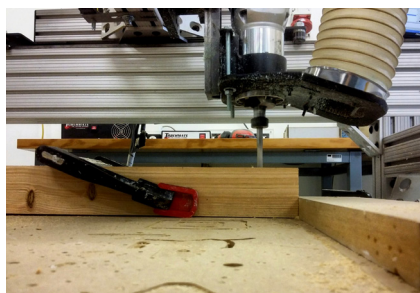
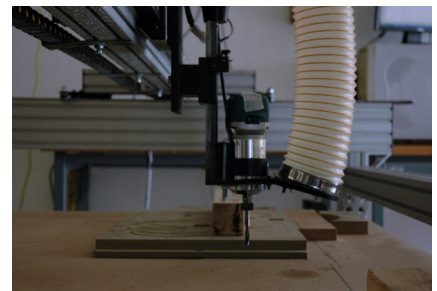
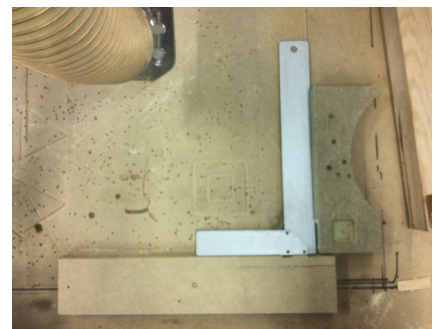
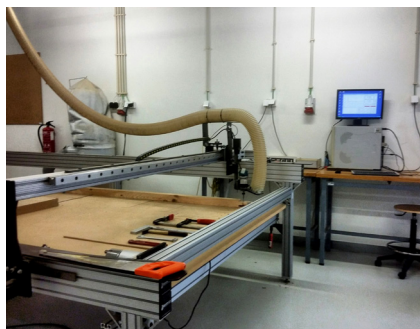


Figura 25. Funcionamento fresadora, fotos de autor.

### 3.2.1.A Pinos, baseado em “Igetashikuchi”

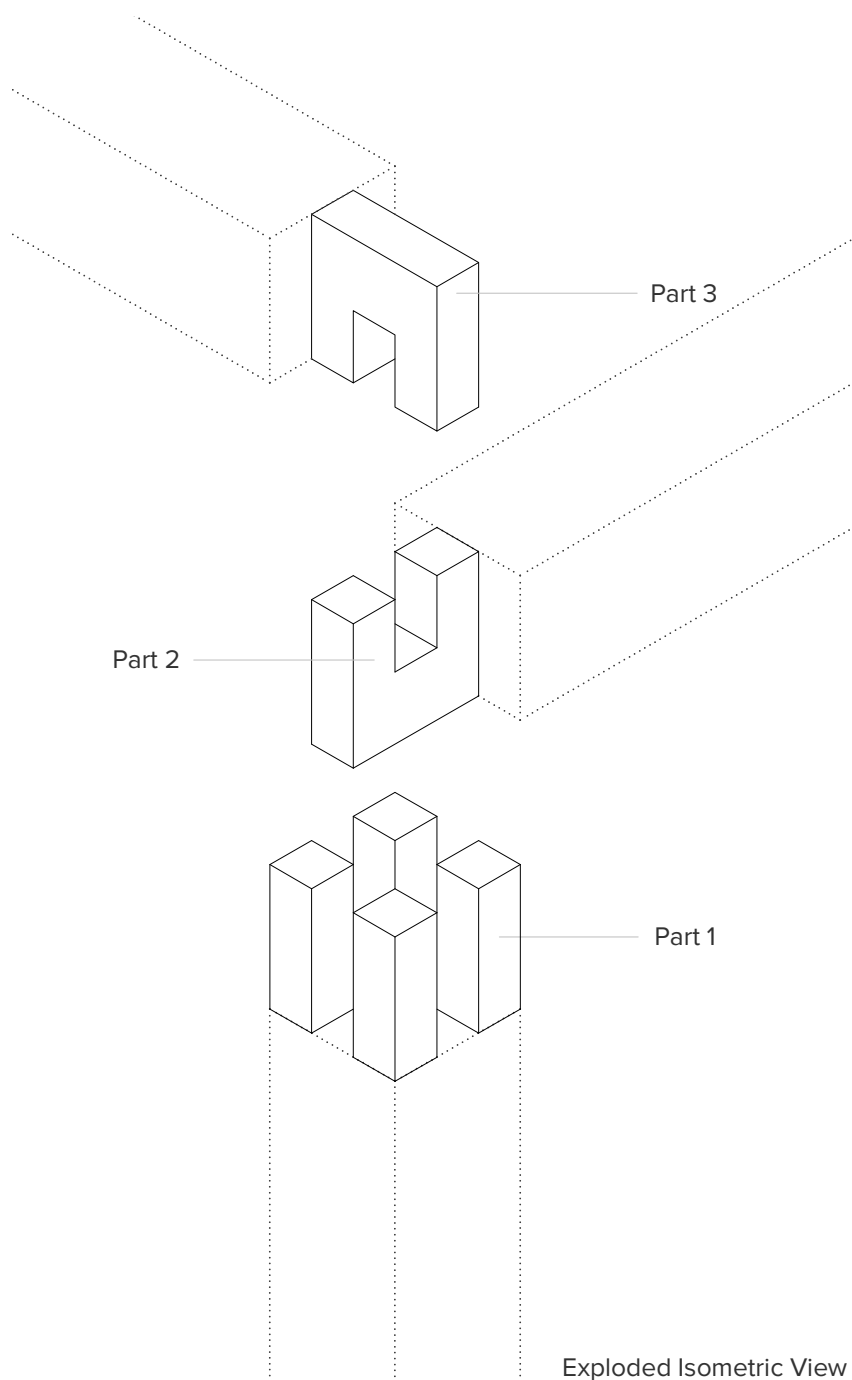


Figura 26. Vista axométrica da ligação 4 Pinos.

## 3.2.1.A.I Definição da ligação

A ligação de madeira, denominada 4 pinos define-se pela articulação de três componentes, ou seja, une três direções perpendiculares entre si. Sendo estes componentes, 4 pinos, “U” e “Π”, cada um deles dedica-se a uma direção específica. Um primeiro, 4 pinos, é dedicado ao barrote de madeira que segue o alinhamento do eixo vertical (v1 ou v2), o segundo, “U”, desenvolve-se a partir do barrote correspondente ao eixo horizontal (h2) e o terceiro elemento, “Π”, segue o alinhamento dos eixos diagonais (d2, d3 e d4). Todos estes componentes são perpendiculares entre si.

O primeiro componente, 4 pinos, desenvolve-se através do desbaste dos outros dois componentes no barrote de madeira, ou seja, são desbastados os elementos “U” e “Π”, que quando unidos formam uma cruz, e resulta na existência de quatro paralelepípedos, que se traduzem em quatro pinos que recebem posteriormente os outros dois elementos. Servem de trava e alinhamento para os outros componentes. Os quatro paralelepípedos desenvolvem-se segundo uma grelha quadrangular de 1/3 da aresta do cubo, que segue a variante *Part dimensions* (0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14 e 0.16 metros), sendo que cada um dos paralelepípedos se encontra num dos vértices mais afastados do centro. Pode-se compreender pela Imagem Part 1 o componente 1.

O segundo, “U”, tal como o anterior, resulta do desbaste dos outros dois componentes no barrote de madeira, que lhe serve de base. Resulta numa forma que assemelha o “U”, provem da mesma grelha e segue a mesma variante do componente anterior (*Part dimensions*), mas apenas se concentra nas quadrículas centrais. Analisa-se na Imagem Part 2 para este componente.

O terceiro componente, “Π”, segue os conceitos anteriormente dispostos. Resulta do desbaste do barrote de madeira, através da subtração dos outros dois componentes. A Imagem Part 3 demonstra isso mesmo.

A união destes três componentes forma uma ligação que se suporta a si mesma. É uma ligação que confia na fricção e no detalhe para ligar os diversos elementos.

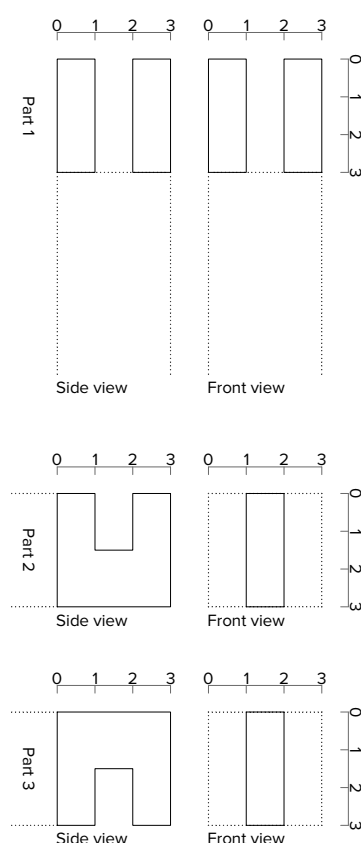


Figura 27. Esquema dimensões, “Part 1”, “Part 2” e “Part 3”.

## 3.2.1.A.II Código, aplicação aos pontos

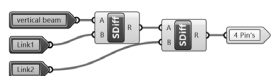
Conforme a descrição feita acima da definição da ligação, definiu-se um modelo em *Grasshopper*. Na secção do código que se refere a esta ligação, 4 pinos, começa-se pela identificação do ponto (P1nm, P2nm, P3nm, P4nm e P5nm), a partir deste o código separa-se em três partes, cada uma delas referente a um componente.

A parte referente ao componente, 4 pinos, parte do ponto identificado. A partir deste, desenha-se uma grelha quadrangular com o ponto no centro e com uma medida de lado correspondente à variante *Part dimension*, sendo que cada um dos quadrados da grelha segue a regra da sua aresta ser 1/3 da medida da mesma variante. Esta grelha permite identificar as partes e dimensões necessárias aos componentes. Mantêm-se assim apenas os quatro quadrados que tocam os vértices mais afastados da grelha, sendo estes quadrados extrudidos de acordo com a dimensão da variante *Part dimension*. Deste modo formam-se os 4 paralelepípedos.

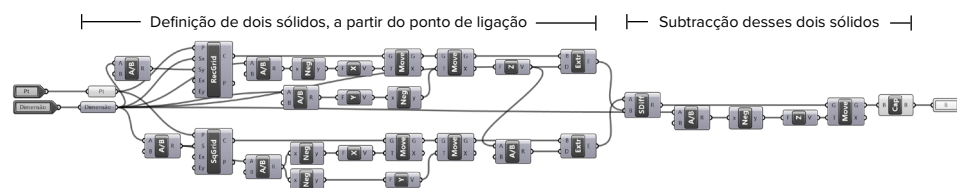
O componente “U” parte, tal como o componente 4 pinos, do ponto e da grelha quadrangular. A partir desta usa a linha dos quadrados centrais, sendo que desta linha o quadrado central apenas extrude metade da variante *Part dimension*, enquanto que, da mesma linha os outros dois quadrados se extrudem na totalidade da variante. Com este processo o componente assemelha-se à forma “U”.

O componente “Π”, processa-se de um modo semelhante ao componente anterior, apenas de forma perpendicular inversa ao componente “U”. Ou seja, a partir da linha dos quadrados centrais, perpendicular à usada pelo componente “U”, quadrado central desta nova linha extrude de acordo com metade da variante *Part dimension*, sendo este paralelepípedo movido de acordo com o eixo Z, metade da dimensão desta variante. Relativamente aos outros dois quadrados, acontece o mesmo que na componente U, sendo extrudidos de acordo com a totalidade da mesma variante. Com este processo o componente assemelha-se à forma “Π”.





Na parte do código correspondente aos 4 pinos, apenas é realizada uma subtração das partes “Π” e “U” pilar em estas se cruzam, de modo a produzir uma ligação correspondente.



Esta porção do código é responsável pelo desenho da porção da ligação, “Π”, para “U”, de SquareGrid (reticula quadrangular) que se desenha com o ponto de ligação como centro, é extrudida para cima (eixo Z positivo), ao invés de ser extrudido para baixo (eixo Z negativo).

Figura 28. Código: 4 Pinos, U e  $\Pi$ .

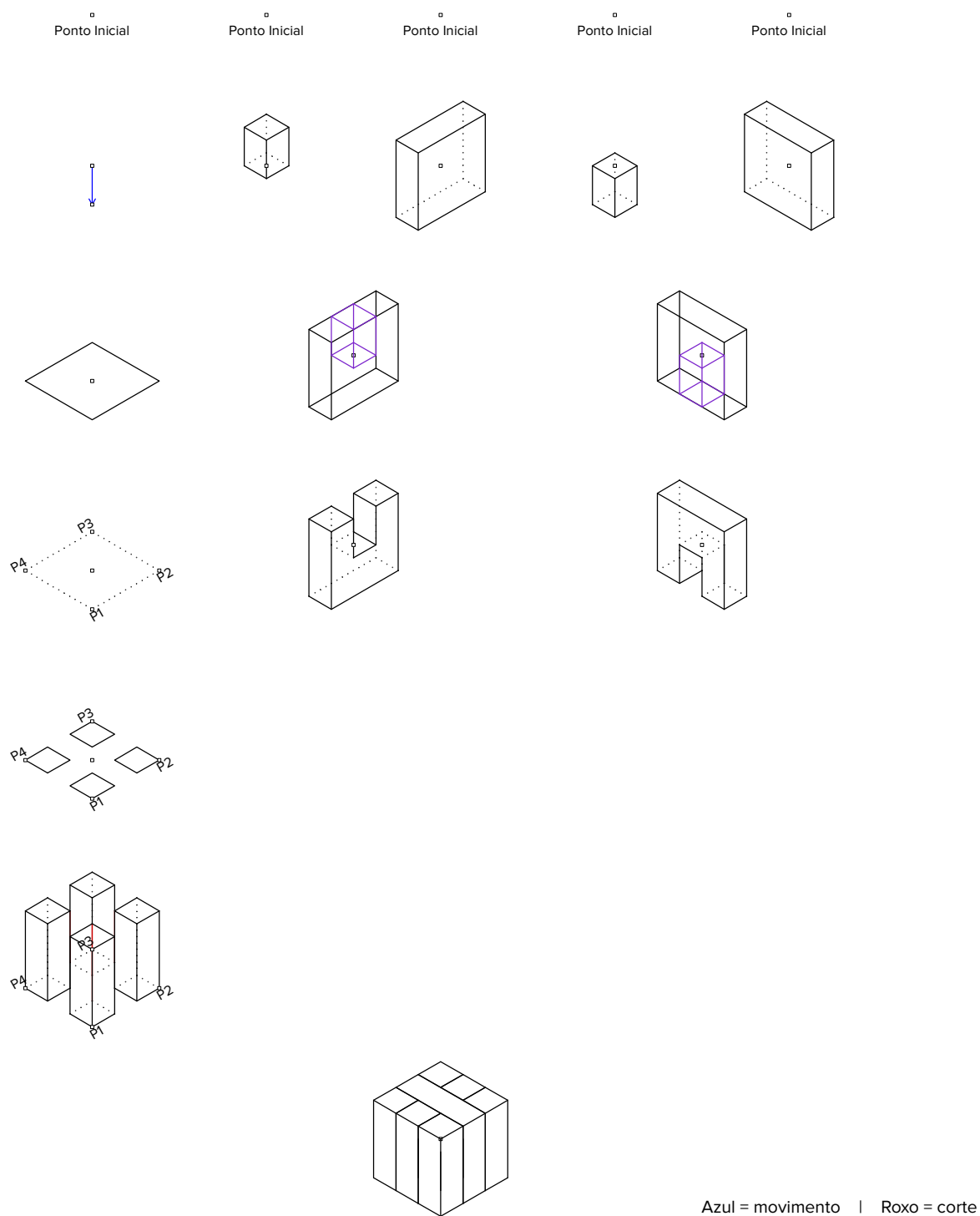


Figura 29. Esquema de desenvolvimento 4 pinos, com base nas regras do código.

## 3.2.1.A.III Prototipagem

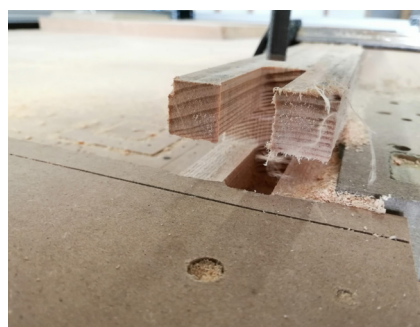
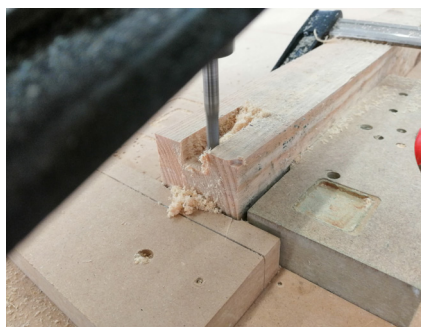
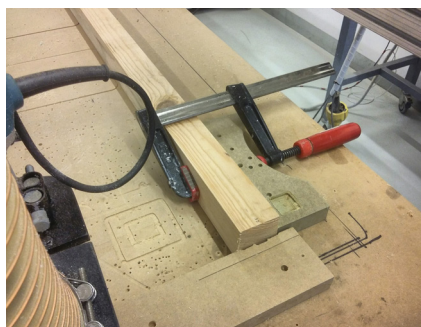
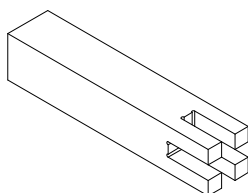
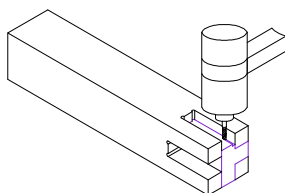
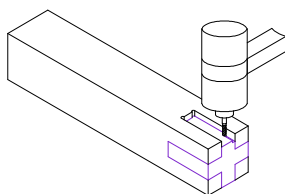
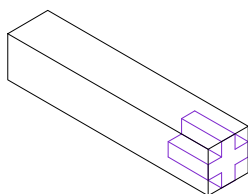
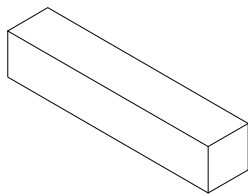


Figura 30. Esquema axonométrico de fabrico 4 Pinos.

Figura 31. Prototipagem 4 Pinos. Fotografia de autor.

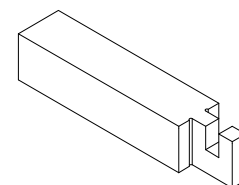
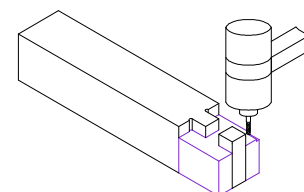
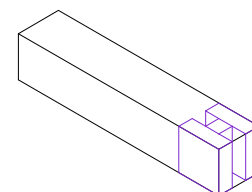
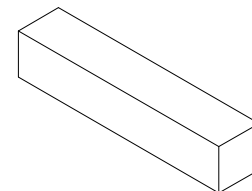
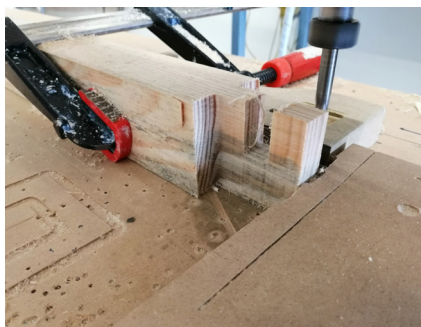
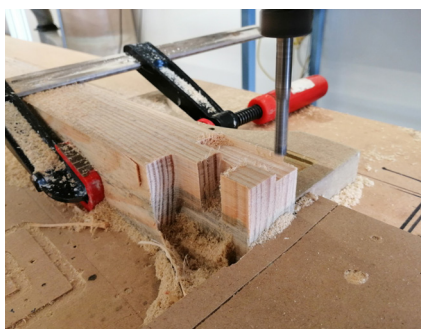
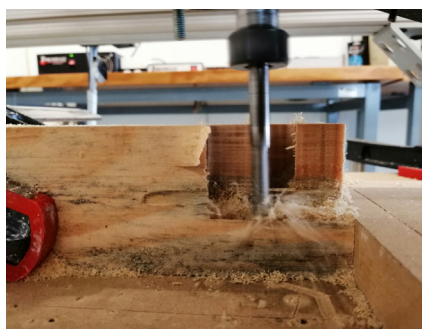
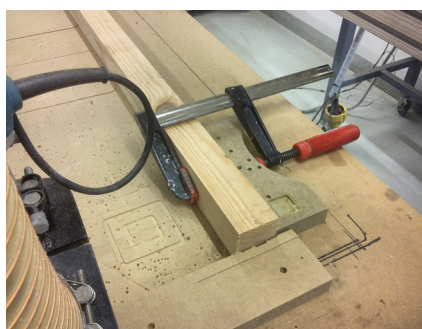


Figura 32. Prototipagem U/П. Fotografia de autor.

Figura 33. Esquema axonométrico de fabrico U/П.



### 3.2.1.B 2half, baseado em “Tsūshin nettowāku setsuzoku”

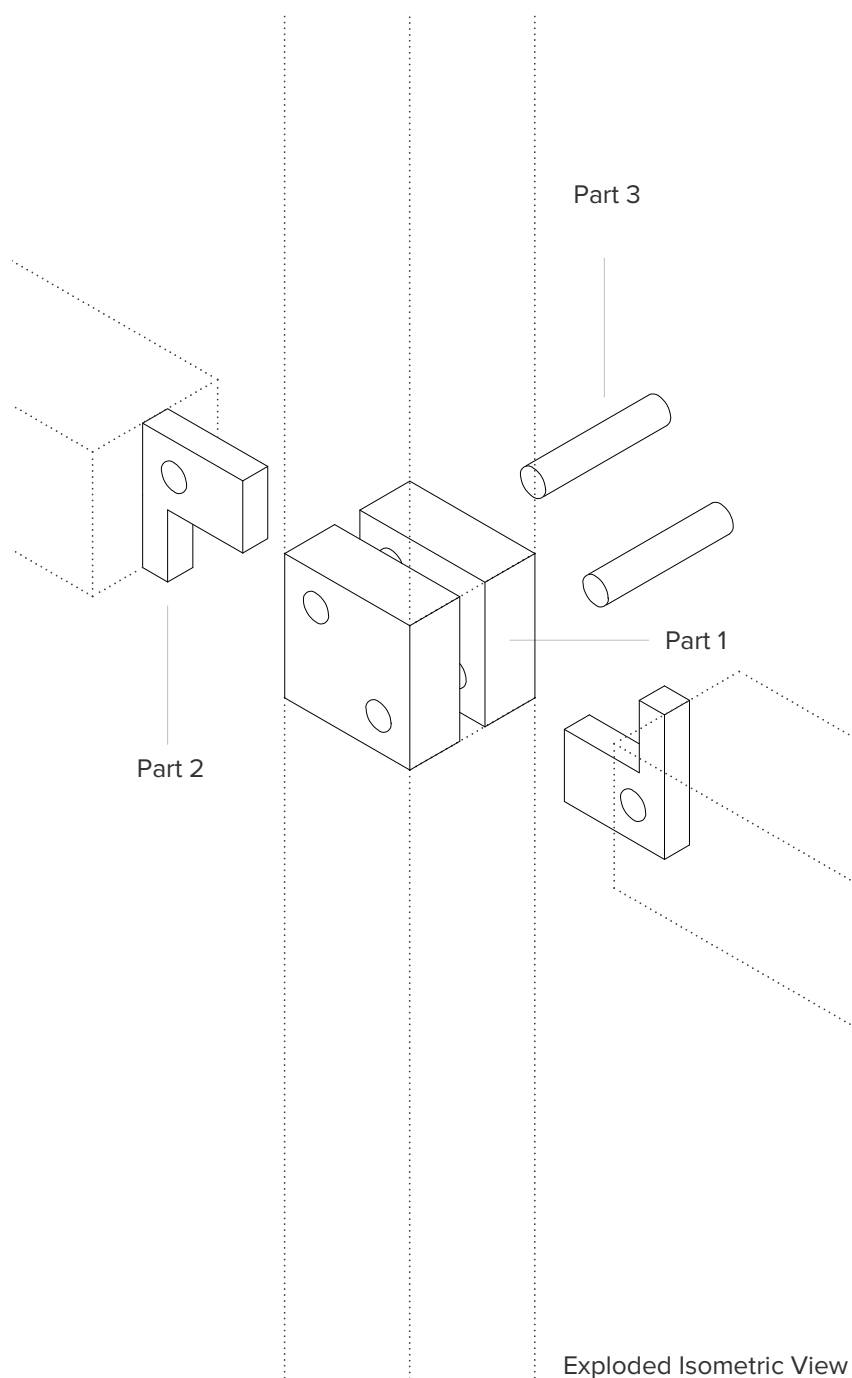


Figura 34. Vista axométrica da ligação 2half.



## 3.2.1.B.I Definição da ligação

A ligação de madeira denominada 2half e definida pela articulação de três componentes, pode ser utilizada em duas variantes. Uma variante, que tal como a ligação 4 pinos, liga três direções perpendiculares entre si, ou seja, une o eixo vertical, eixo horizontal e eixo diagonal, e uma outra em que a ligação vertical se mantém e a ligação horizontal passa a decorrer numa única direção, ou seja, usa-se apenas um eixo horizontal ou um eixo diagonal com o eixo vertical. 2half não é indicado em ligações na extremidade de eixos verticais, mas sim no espaço entre extremidades, ou seja, tem o intuito de funcionar como elementos de suporte entre outras ligações. Esta ligação mantém a ideia da ligação anterior, sendo obtida através do desbaste, ou seja, do corte de entalhes no barrote de madeira.

Os elementos desta ligação, à imagem de 4 pinos, baseiam-se num cubo de aresta igual à dimensão da variante *Part dimensions* (0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14 e 0.16 metros).

O componente 1, parte da subtração dos outros dois componentes, ou seja, consiste num vazio num determinado ponto do barrote de madeira, sendo um encaixe para os outros dois componentes.

O componente 2, consiste em duas peças que seguem o eixo horizontal e o eixo diagonal, sendo que este componente se divide em dois casos. O primeiro consiste em duas peças que se colocam perpendiculares entre si, apesar de ainda seguirem o plano horizontal, ou seja, uma união entre o eixo horizontal e diagonal. Um segundo onde estas mesmas duas peças estão contidas no mesmo eixo horizontal ou diagonal, isto é, a união de duas partes do eixo horizontal ou de duas partes do eixo diagonal. Este componente segue a regra de na sua base ter por dimensões  $\frac{1}{3}$  da variante *Part dimensions* em largura e a dimensão completa da mesma variante em comprimento e altura.

O componente 3, sendo o mais simples dos três, tem a tarefa de servir como elemento de bloqueio na ligação, ou seja, consiste numa cavilha que aquando da sua colocação na ligação a mantém estável e segura. Consiste num cilindro com altura igual à variante *Part dimensions* e de diâmetro 0.015 metros.

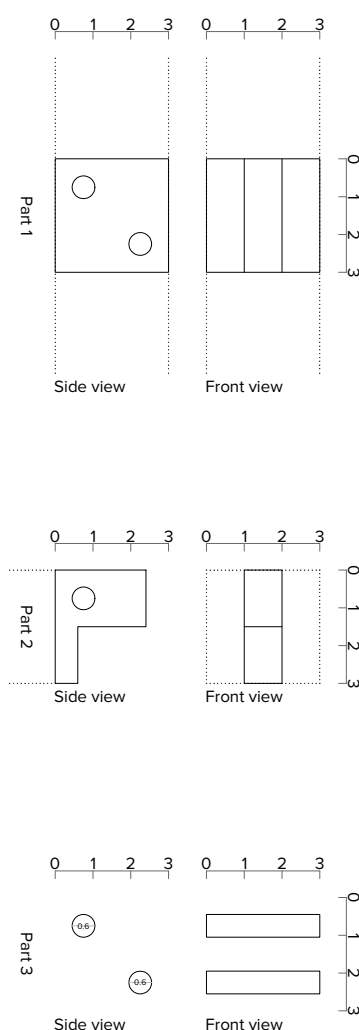


Figura 35. Esquema dimensões, “Part 1”, “Part 2” e “Part 3”.

## 3.2.1.B.II Código, aplicação aos pontos

Conforme a descrição feita acima da ligação, definiu-se um modelo em *Grasshopper*. Na secção do código que se refere a esta ligação, 2half, começa-se pela identificação do ponto (P1nm, P2nm, P3nm, P4nm e P5nm), e a partir deste, o código separa-se em três partes, cada uma delas referente a um componente.

A primeira parte segue o eixo vertical, e é obtida através da subtração dos componentes 2 e 3 ao barrote de madeira pertencente ao ponto e ao eixo vertical em questão.

A segunda parte segue a direção do eixo horizontal ou diagonal, sendo que se cinge ao ponto anteriormente indicado. A partir do ponto desenha-se um retângulo de comprimento igual à dimensão da variante *Part dimensions* e com largura igual a 1/3 dimensão da mesma variante. Este retângulo é dividido em duas partes, uma primeira que tem de comprimento 3/4 da dimensão da variante e um outro com a 1/4 da mesma variante. O retângulo maior é extrudido metade da dimensão da variante, sendo o mais pequeno extrudido na altura total da dimensão da variante *Part dimensions*. Como último passo para este componente será a subtração do componente 3 para que este mais tarde possa unir o mesmo.

Na terceira parte move-se para metade da dimensão *Part dimensions* uma cópia do ponto anteriormente determinado, segundo o eixo Y. A partir deste novo ponto, movem-se outras duas cópias para 1/4 da dimensão *Part dimensions*, sendo uma no sentido do positivo do eixo X e uma outra no negativo, obtendo dois novos pontos. Estes novos pontos movem-se no eixo Z, segundo 1/4 da dimensão *Part dimensions*. O ponto que anteriormente se moveu no sentido negativo do eixo X, segue o eixo Z no sentido negativo, ao mesmo tempo, o ponto que se moveu no sentido positivo segundo o eixo X move-se no mesmo sentido positivo segundo o eixo Z. Com estes pontos como centro desenharam-se circunferências que pertencem ao plano Y de diâmetro 0.015 metros, sendo estas circunferências extrudidas ao longo do eixo Y, sentido negativo, segundo a dimensão da variante *Part dimensions*.

Devido à complexidade do código produzido para esta ligação, não é possível a apresentação gráfica de forma clara do mesmo.



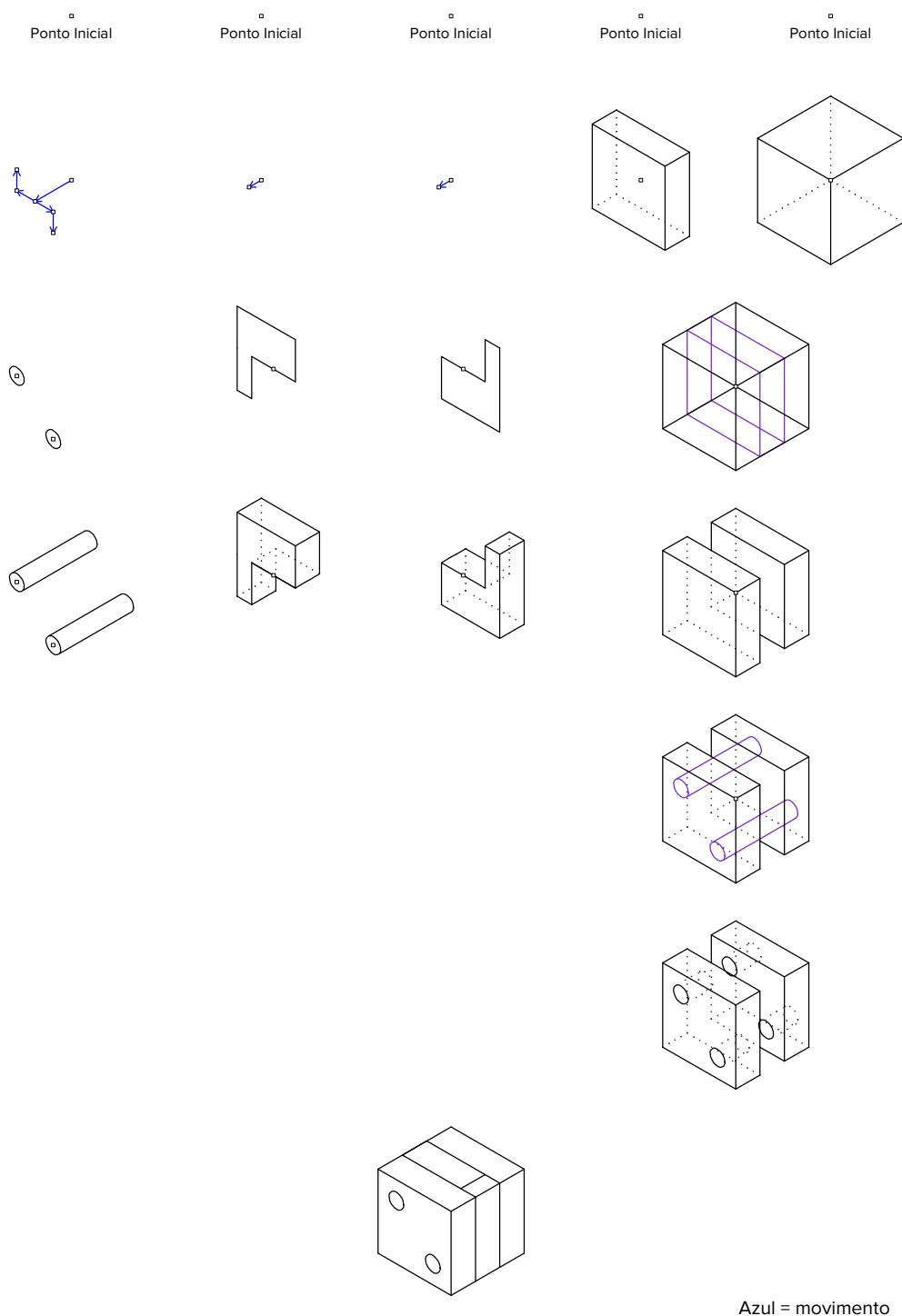


Figura 36. Esquema de desenvolvimento 2half, com base nas regras do código.

## 3.2.1.B.III Prototipagem

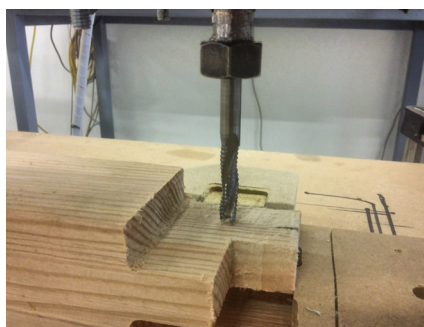
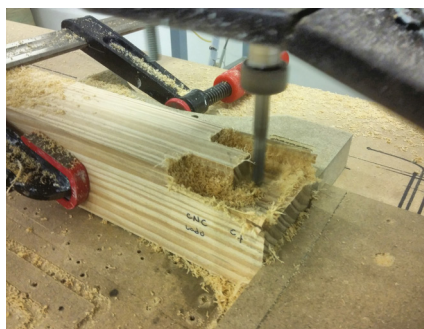
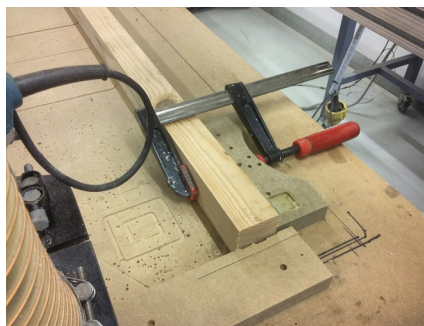


Figura 37. Prototipagem Componente 2.  
Fotografia de autor.

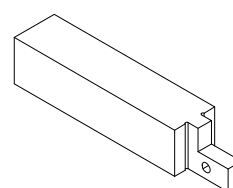
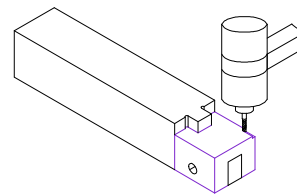
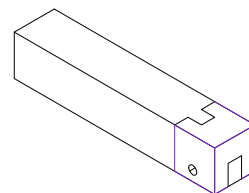
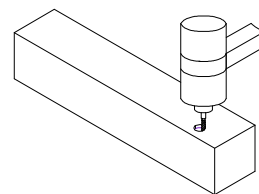
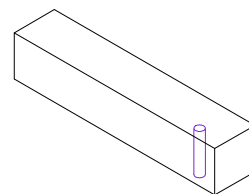
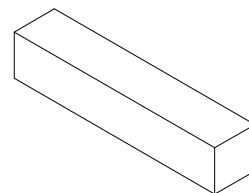


Figura 38. Esquema axonométrico de  
fabricao componente 2.

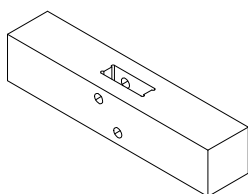
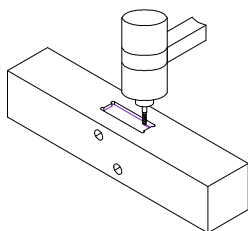
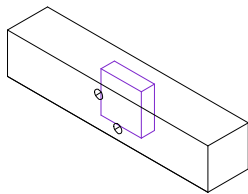
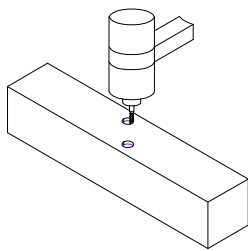
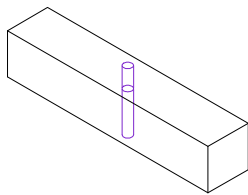
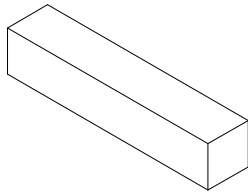


Figura 39. Esquema axonômico de fabrico componente 1.

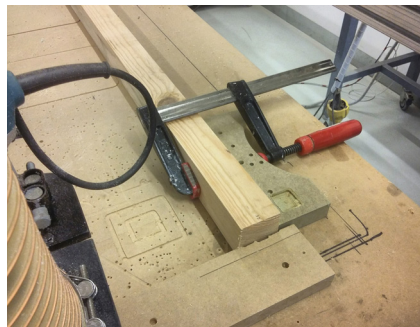


Figura 40. Prototipagem Componente 1. Fotografia de autor.

### 3.2.1.C Roof, baseado em “Ai-jauri”

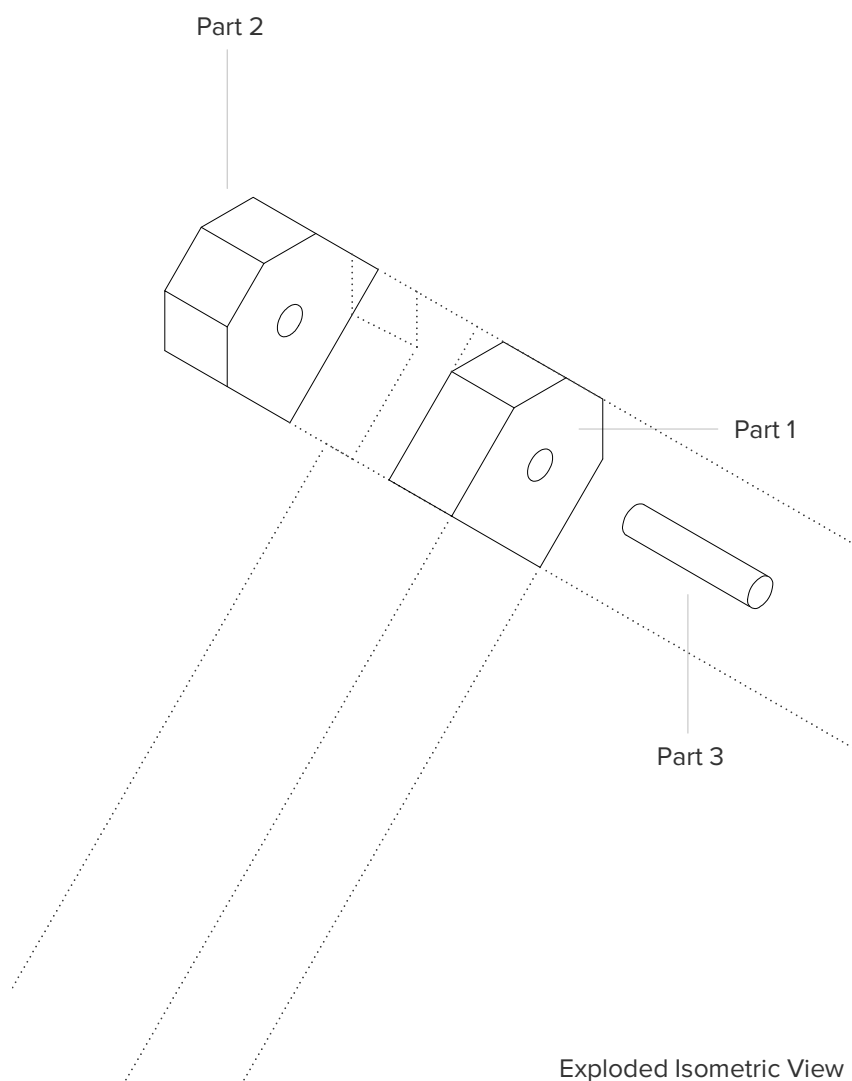
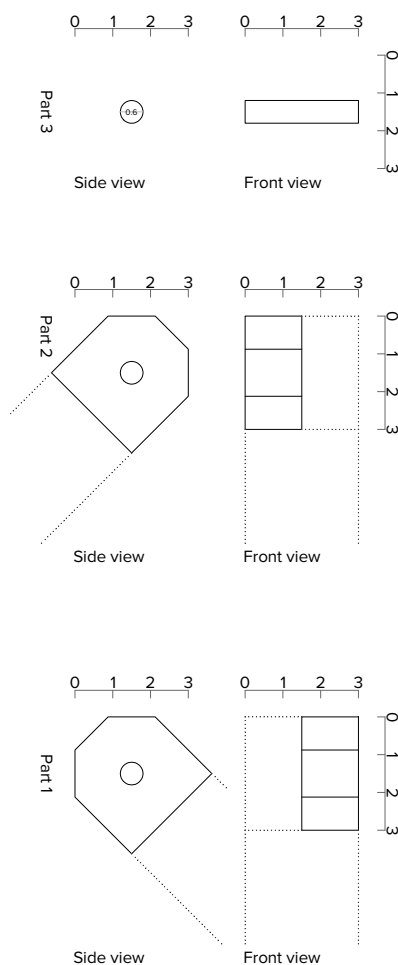


Figura 41. Vista axométrica da ligação Roof

## 3.2.1.C.I Definição da ligação



Este tipo de ligação é usado na cobertura inclinada, pelo que não se aplica no caso de uma cobertura plana, sendo definida por dois elementos. Um primeiro elemento que se baseia em dois barrotes de madeira, com um entalhe de metade da dimensão da variante *Part dimensions*. Este entalhe funciona como duas metades, ou seja, tomando a ligação por um cubo seccionado pelo centro, o lado esquerdo pertence ao eixo inclinado 1 (I1nm) e o lado direito pertence ao eixo inclinado 2 (I2nm). Como método de travação, à semelhança da ligação 2half, seria usado uma cavilha.

Devido às variantes da inclinação da cobertura poderem ser determinadas de forma independente entre esquerda e direita, *Angle left* e *Angle right* (ângulos entre 0 e 45°, abertura à direita e esquerda, respetivamente), a ligação terá de acompanhar e adaptar-se aos diferentes ângulos entre as inclinações. De modo a que a ligação acompanhe os ângulos da cobertura, esta está ligada aos eixos que fazem parte de cada lado, ou seja, o barrote de madeira que faz parte da construção da inclinação do lado esquerdo é seccionado pelo barrote pertencente ao lado direito, o mesmo se repete, em inverso no lado direito. Este sistema garante que a ligação seja sempre vincada entre as duas inclinações.

Figura 42. Esquema dimensões, "Part 1", "Part 2" e "Part 3".

## 3.2.1.C.II Código, aplicação aos pontos

Conforme a descrição feita acima da ligação, definiu-se um modelo em *Grasshopper*. Na secção do código que se refere a esta ligação, começa-se pela identificação do ponto (P1nm, P2nm, P3nm, P4nm e P5nm), e a partir deste, o código separa-se em duas partes, sendo a primeira referente a dois componentes, esquerdo e direito e uma segunda parte referente a uma cavilha.

A primeira parte, dividida entre esquerdo e direito, corresponde aos eixos inclinados esquerdo e direito. Com o ponto anteriormente determinado no centro define-se um cubo de aresta igual à dimensão da variante *Part dimensions*, divide-se este cubo em duas partes iguais ao passar um plano X de corte pelo ponto central. O paralelepípedo que se encontra no lado positivo do plano de corte é alinhado com eixo inclinado 1 (I1nm) e passa a acompanhar o ângulo da variante, *Angle left*, de forma a acompanhar sempre que esta variante seja alterada. O lado do cubo que se encontra relativamente ao plano de corte no seu lado negativo, alinha-se com o eixo inclinado 2 (I2nm) e passa a acompanhar o ângulo da variante, *Angle right*, de modo manter-se em sintonia com a mesma. Devido aos diferentes ângulos entre esquerda e direita, não seria possível I1nm e I2nm serem perpendiculares, pois na sua intersecção não se forma um angulo reto. Logo, ao aplicar-se o mesmo conceito aos paralelepípedos correspondentes aos eixos inclinados, esquerdo e direito, seria necessário subtrair certas porções dos paralelepípedos inversos no eixo, ou seja, seria necessário que o paralelepípedo pertencente ao eixo inclinado esquerdo fosse subtraído ao barrote de madeira que pertence ao eixo inclinado direito, e vice versa, de modo a que o mesmo se passe no barrote de madeira pertencente ao eixo inclinado esquerdo. Após este procedimento, apenas lhe faltaria subtrair a segunda parte do código, para que esta mais tarde possa servir de cavilha para completar a ligação.

A segunda parte consiste em mover uma cópia do ponto identificado, segundo o eixo X, metade da dimensão da variante *Part dimensions*, no sentido positivo, sendo que, usando este ponto como centro desenha-se uma circunferência que pertence ao plano Y de diâmetro 0.015 metros. Esta circunferência é extrudida ao longo do eixo Y, sentido negativo, segundo a dimensão da variante *Part dimensions*, resultando numa cavilha que passa pelo ponto identificado.



O diagrama ilustra o processo de geração de geometrias de cobertura a partir de sólidos de referência. Ele é dividido em duas seções principais:

- Geometrias da cobertura:** Esta seção recebe as entradas "Join roof right" e "Join roof left". O "Join roof right" gera as geometrias "A+B" e "A/B". O "Join roof left" gera a geometria "A-B".
- Definição de sólidos para subtração das geometrias da cobertura:** Esta seção define os sólidos de referência. Os sólidos "A+B" e "A/B" são definidos como "Box" com eixos X, Y e Z. O sólido "A-B" é definido como "Box" com eixos X, Y e Z. Os sólidos "A+B" e "A/B" são definidos como "Box" com eixos X, Y e Z. Os sólidos "A-B" são definidos como "Box" com eixos X, Y e Z.

Os sólidos de referência são então utilizados para a subtração das geometrias da cobertura, resultando na definição final dos sólidos de referência.

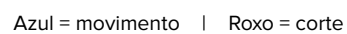


Figura 44. Esquema de desenvolvimento Roof, com base nas regras do código.

# 3.2.1.C.III Prototipagem

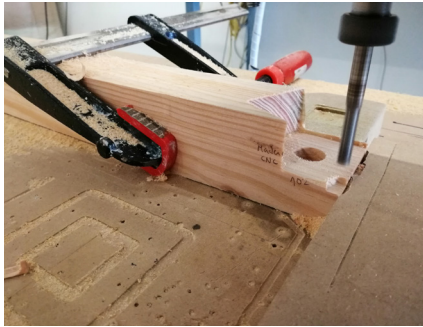
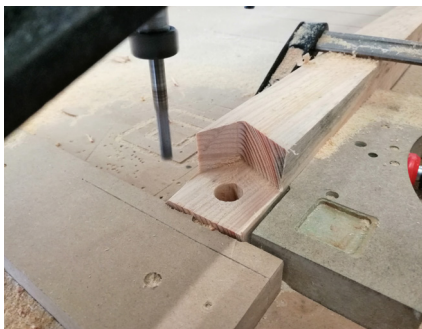
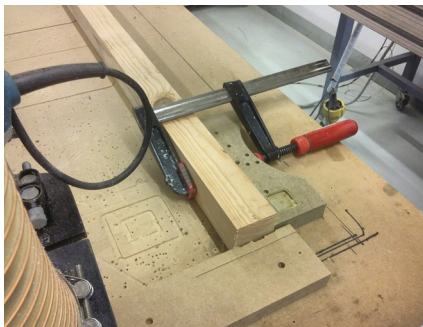


Figura 45. Prototipagem Roof.  
Fotografia de autor.

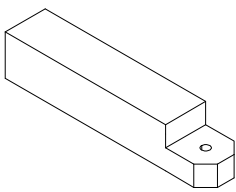
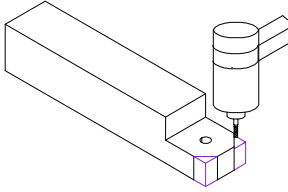
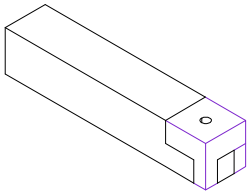
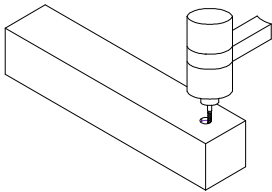
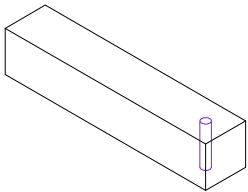
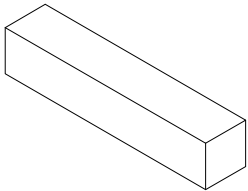


Figura 46. Esquema axonométrico  
de fabrico Roof.





### 3.2.1.D Lock joint, baseado em “Kai no kuchi tsugi”

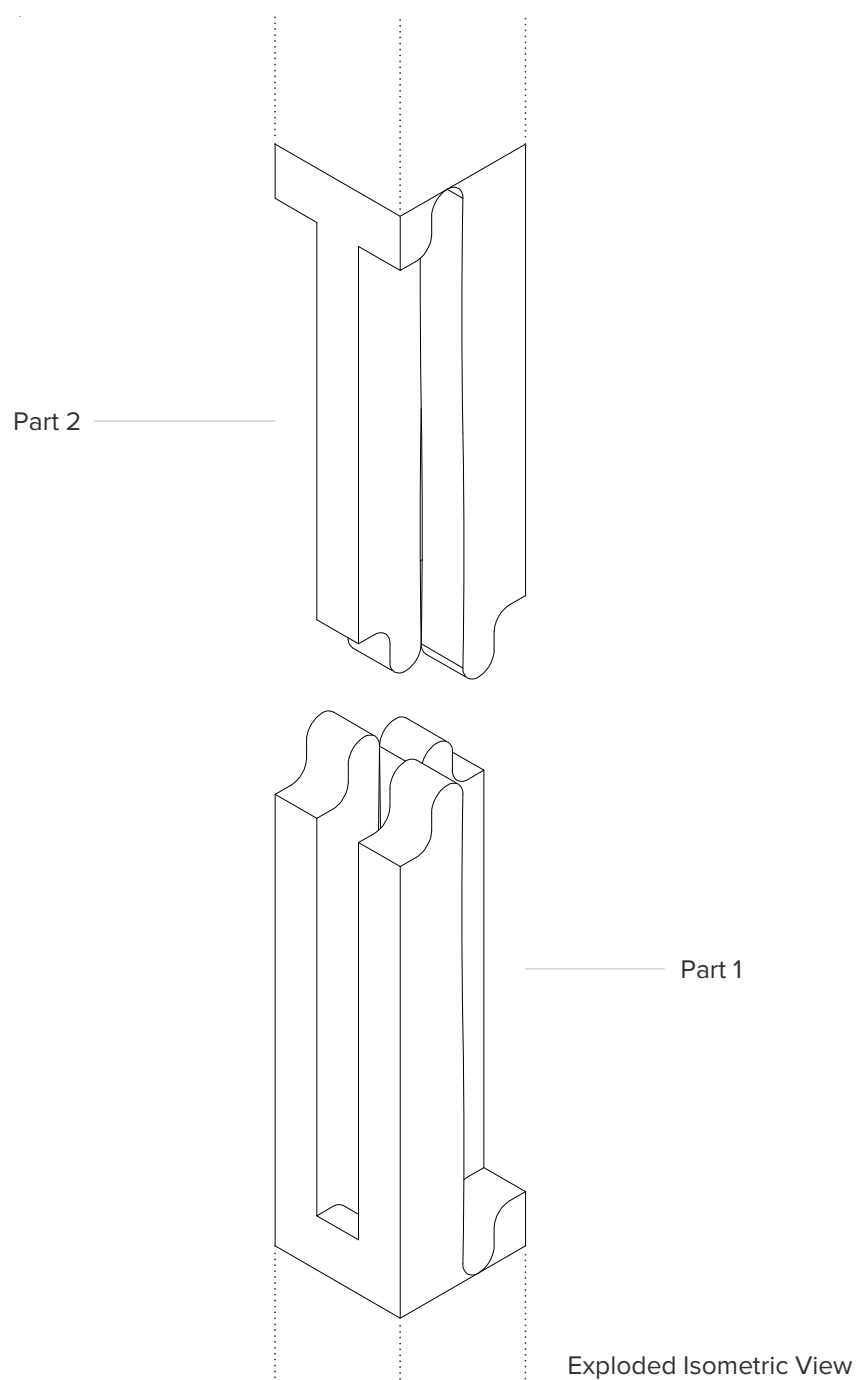


Figura 47. Vista axométrica da ligação Lock joint.

## 3.2.1.D.I Definição da ligação

O laboratório SPACE10, sediado em Copenhaga e criado pelo IKEA, convidou três arquitetos, sendo eles Yuan Chieh Yang, Benas Burdulis, e Emil Froege, para explorar o potencial da utilização da fresadora CNC para o melhoramento de técnicas artesanais tradicionais. Este projeto visava encontrar uma maneira de criar objetos que mantinham o toque único e a sensação de algo feito à mão, apesar de ser digitalmente fabricado. Isto dirigiu os três arquitetos para um estudo de métodos artesanais tradicionais, a explorar possibilidades e a expandir consequentemente o uso e a adaptabilidade das ferramentas digitais.

O arquiteto taiwanês Yuan Chieh Yang, interessado na carpintaria tradicional japonesa usou a fresadora CNC, como método de desbaste de criação da peça. Inspirou-se na ideia da coluna de madeira e usou assim a fresadora CNC para construir uma coluna de madeira com 10 metros de altura. Para tal considerou que não seriam usados quaisquer parafusos ou ferramentas de mão. Ao estudar as técnicas tradicionais percebeu a limitação do cinzel, que apenas pode realizar cortes em linha reta, sendo que o uso da máquina permitiu-lhe adicionar curvas sutis e precisas.

Yang também sugeriu o uso de peças de madeira laminada, a fim de tornar o processo eficiente e escalável, de modo a aumentar a sua aplicabilidade na indústria da construção. A tênue curva que Yuan introduziu nesta ligação facilita o processo de encaixe, fortalece o equilíbrio da mesma, sem prejudicar a capacidade de reverter a junta, ou seja, com a mesma curva a curvatura da ligação ficou mais forte e, no entanto, mantém a capacidade de a ligação ser desfeita e refeita sem qualquer problema.

Esta ligação é constituída por dois grupos de três pontas, sendo que um grupo é dedicado à parte inferior da secção da coluna e o outro à parte superior da mesma coluna. Seguem a disposição de uma grelha com duas colunas e três linhas colocando as pontas responsáveis pela ligação na posição, coluna 1 linha 1, coluna dois linha dois e coluna 1 linha 3, sendo que na outra parte da ligação segue a disposição coluna 2 linha 1, coluna 1 linha 2 e coluna 2 linha 3. Estas pontas devem ter como princípio três vezes o comprimento da base em altura, ou seja, se a base for um quadrado de 0.06 por 0.06 metros a altura deverá ser de 0.18 metros ( $0.06 \times 3 = 0.18$ ). A curva introduzida nas pontas aumenta o nível de fricção que mantém a ligação coesa e fixa, sendo que no processo de reversão da mesma, esta curva, combinada com a flexão do material, permite a reversão da mesma.

## 3.2.2 Plástico

A junta em PLA é uma ligação que se destaca pelo seu método de fabrico, já que este, por se realizar através da adição de material e não pela subtração do mesmo, permite a construção de peças com o mínimo de excesso ou perdas de material. Este método é alcançado através da sobreposição de layers, conseguindo espessuras equivalentes a 0.1 mm por layer, isto é, permite obter um grande nível de detalhe e precisão. Deste modo, é possível obter peças em que apenas a fricção será suficiente para criar a ligação.

Para a construção deste tipo de junta será necessário a utilização de uma máquina de fabrico aditivo, sendo que neste caso de estudo foi usada uma impressora FFF.

Tal como a exemplo das juntas de madeira estudadas, permite desprezar elementos de ligação (ligantes ou outros) como colas, ao mesmo tempo que permite uma reutilização de todos os elementos, do mesmo modo que a construção em junta seca.

Ao seguir este tipo de ligação, propôs-se o desenvolvimento de uma ligação com forma inspirada no sólido de Arquimedes, Rombicuboctaedro. Esta forma contém dezoito faces quadradas e oito triângulos equiláteros, sendo que, as faces quadrangulares são usadas como pontos de ancoragem ou ligação deste sólido com a viga ou pilar. As faces triangulares são usadas como reforço estrutural da peça. Denominou-se esta ligação de Node, sendo esta da própria autoria.

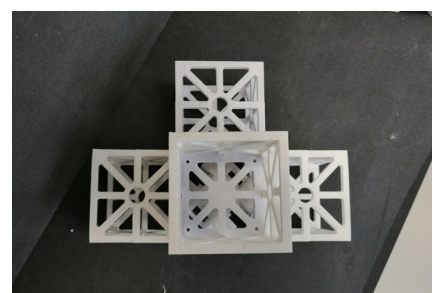
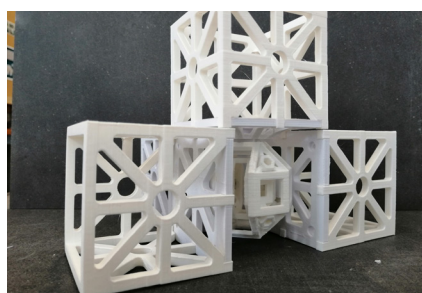
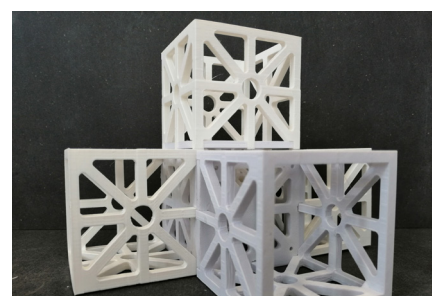
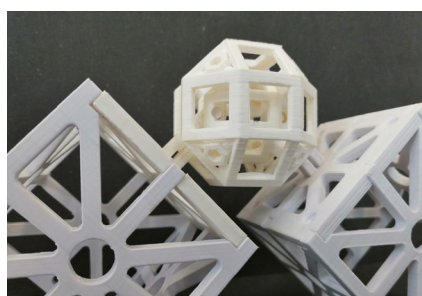
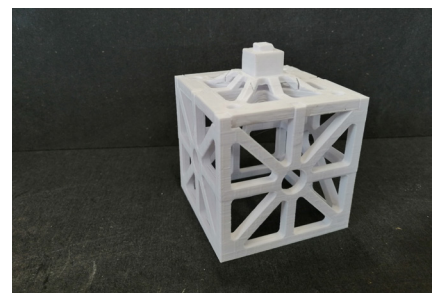
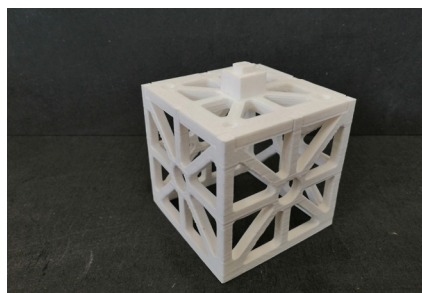
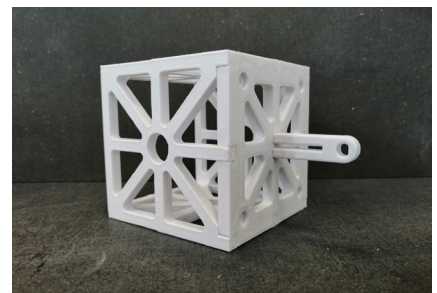
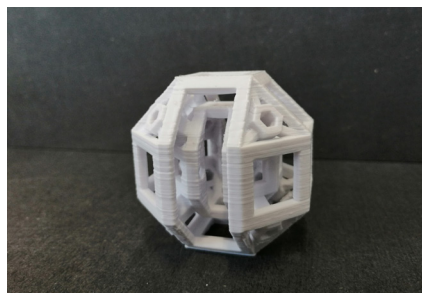


Figura 48. Elementos producidos através de fabrico aditivo.

# 3.2.2.A Node

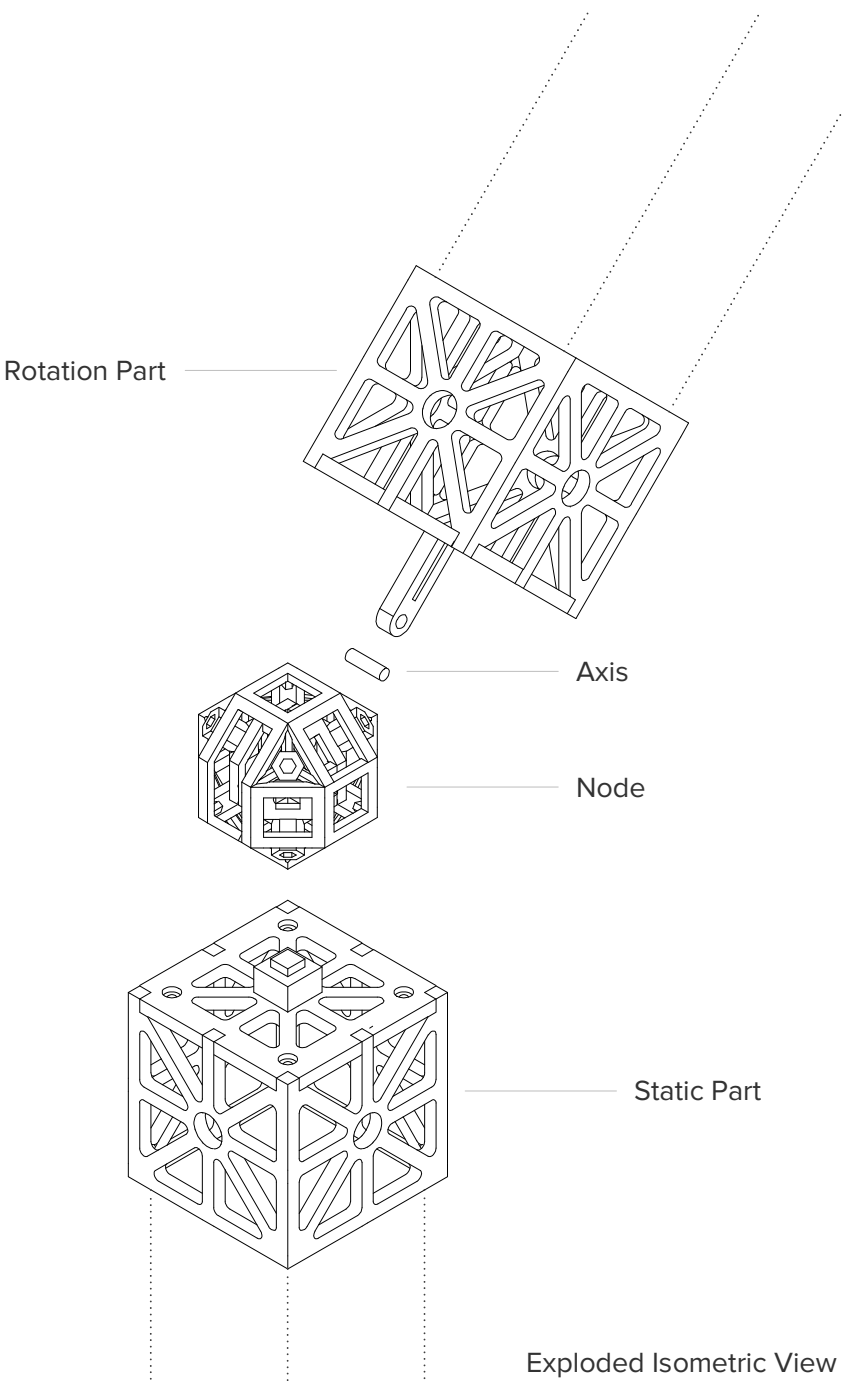
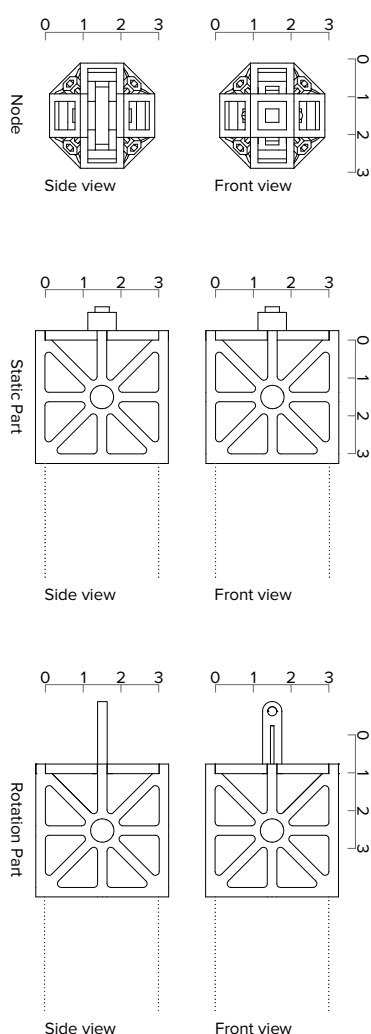


Figura 49. Vista axométrica da ligação Node.

## 3.2.2.A.I Definição da ligação



A ligação de PLA, denominada Node, concentra-se em dois modos de ligação e é composto por 3 elementos.

Um primeiro modo que se concentra em ligar elementos perpendiculares entre si, composto por 2 elementos. Um primeiro elemento é representado pelo Rombicuboctaedro, ou seja, o elemento que serve de junção à ligação. O segundo elemento, composto por uma caixa que envolve o elemento alvo da ligação, dispõe de um encaixe, que liga através de fricção esta caixa ao Rombicuboctaedro, de modo a completar a ligação.

Um segundo modo de ligação, que apesar de poder coexistir com o primeiro, concentra-se numa ligação que pode rodar em torno de um eixo, com um ângulo de rotação de 180 graus. Este modo também é compreendido por dois elementos, sendo um primeiro um mesmo Rombicuboctaedro, onde foram retiradas seis faces, de modo a promover espaço para a realização desta rotação. O segundo elemento, à imagem do primeiro modo de ligação, é composto por uma caixa que envolve o elemento a ser ligado e que dispõe de um encaixe que lhe permite através de uma furação, ao ligar ao Rombicuboctaedro alterado, criar a rotação em torno de um eixo.

O Rombicuboctaedro e os dois elementos caixa, seguem as dimensões da variante *Part dimensions* (0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14 e 0.16 metros). Esta ligação desenvolve-se a partir do fabrico aditivo, FFF. O seu processo de produção ou o seu desenvolvimento segue as diversas fases do processo de desenho através de um software computacional. A partir deste, e através de um software do tipo slicer como “Cura”, é realizado um slicer por layers da peça e transforma esta informação num código que, quando transferido para a impressora, dá início à produção da peça.

Figura 50. Esquema dimensões, “Part 1”, “Part 2” e “Part 3”.

## 3.2.2.A.II Código, aplicação aos pontos

Para a elaboração do modelo, através do *Grasshopper*, identificou-se o ponto representativo das ligações, (P1nm, P2nm, P3nm, P4nm e P5nm). A partir destes, desenvolvem-se à semelhança das outras ligações três componentes que resultam na construção desta ligação.

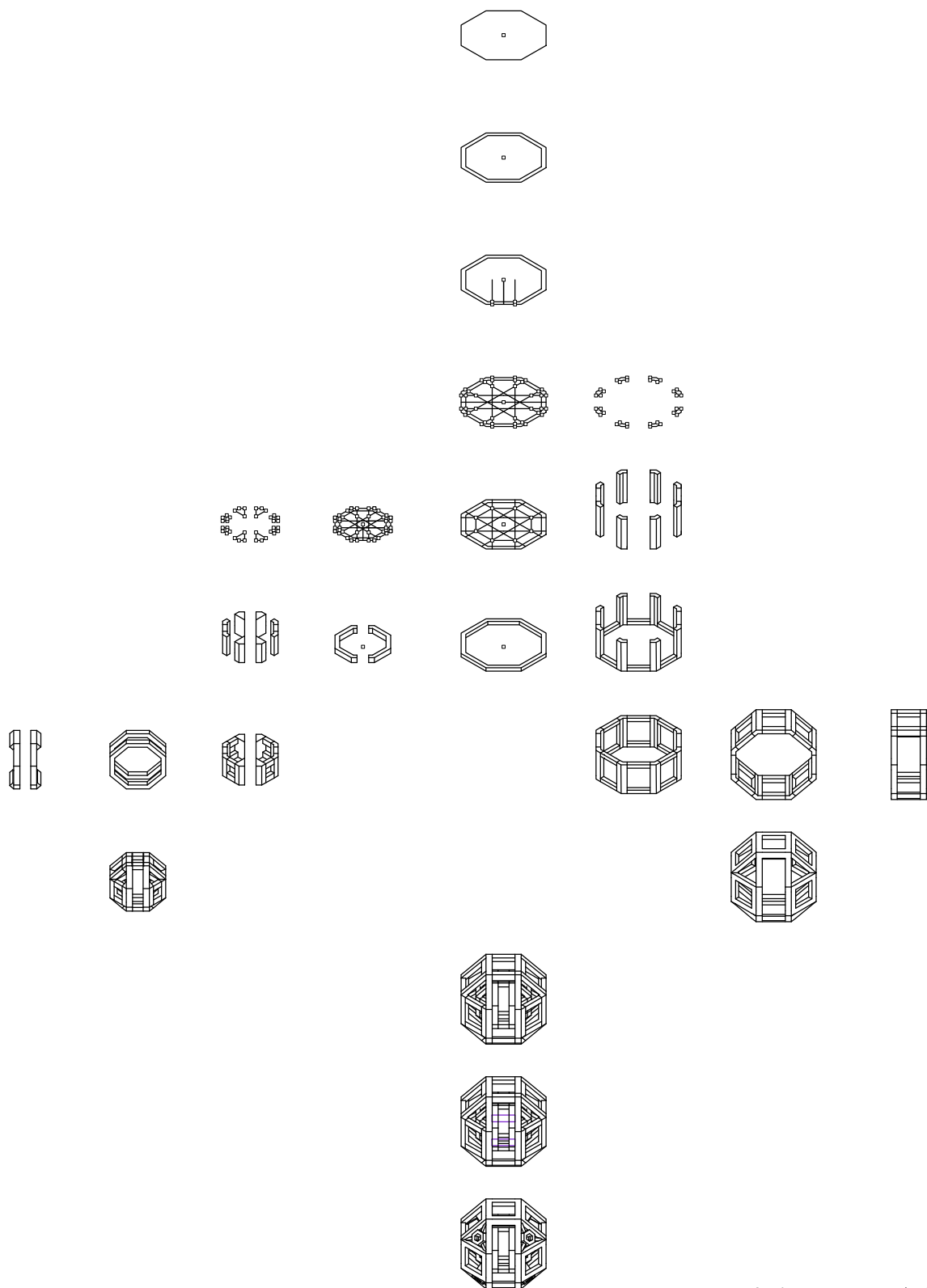
O primeiro, o “Rombicuboctaedro”, que com o ponto a centro, gera um polígono de oito lados e de raio metade da variante *Part dimension*. A partir do centro de cada um dos lados do octógono desenhou-se uma linha que une cada um destes pontos ao centro do polígono. Após o desenho das linhas, realizou-se um offset de 10 mm desde cada uma das linhas e, a partir do octógono realizou-se um offset com dimensão igual a  $(\text{Part dimension}) / 20$ , em direção ao interior do polígono e, deste modo criam-se dois polígonos concêntricos que compreendem uma superfície. Na interceção das linhas com os dois polígonos desenham-se pontos que, em conjunto com os vértices mais próximos dos dois polígonos, desenharam o perímetro de oito pilares. Extrude-se a superfície em Z, segundo a distância entre um vértice do polígono maior e uma das linhas de offset mais próximas, movendo uma cópia desta geometria segundo a dimensão equivalente a um dos lados do octógono original. De acordo com esta medida, extrudem-se também as bases dos pilares. Cria-se assim, na união das duas geometrias octogonais com os pilares, a base para o desenho do Rombicuboctaedro. Uma cópia desta base é rodada 90° em torno do ponto central segundo o eixo Y, e novamente uma cópia desta nova geometria é rodada 90° em torno do ponto central. De modo a completar o Rombicuboctaedro, retira-se à geometria presente no plano XY dois lados opostos, de maneira a resultar a falta de seis faces no Rombicuboctaedro. Após a união destas três geometrias, obtém-se o Rombicuboctaedro. A partir do ponto central, repete-se o mesmo processo, mas com metade da variante *Part dimension*. Nos triângulos produzidos pela união das geometrias, projetam-se sólidos que servem de ligação entre os dois Rombicuboctaedros, de modo a formar o Node.

O segundo elemento, “caixa estático”, parte de um cubo com dimensões correspondentes à variante *Part dimension*. A partir deste, realiza-se um offset com  $(\text{Part dimension}) / 20$  em direção ao exterior do mesmo. A este novo cubo é retirado uma das faces, sendo que na face oposta é desenhado um quadrado de lado igual a 20mm, que em seguida é extrudido, segundo a mesma dimensão. Assim desenha-se o encaixe que irá ligar a caixa ao Node.



O terceiro elemento, “caixa rotação”, de forma semelhante ao elemento anterior, usa o mesmo princípio de cubo sem uma das faces, sendo que, na face oposta à retirada, desenha-se um retângulo de dimensões 10mm por 20mm que é extrudido de acordo com a dimensão da variante *Part dimension* dividida por 2. A este volume é retirado um cilindro perpendicular ao mesmo, de modo a que quando este elemento é agregado ao Node, e com a adição de um mesmo cilindro que serve de eixo de rotação, permite que a “caixa rotação” se mova entre 180°.

Devido à complexidade do código produzido para esta ligação, não é possível a apresentação gráfica de forma clara do mesmo.



Azul = movimento | Roxo = corte

Figura 51. Esquema de desenvolvimento Node, com base nas regras do código.

# 3.2.2.A.III Prototipagem

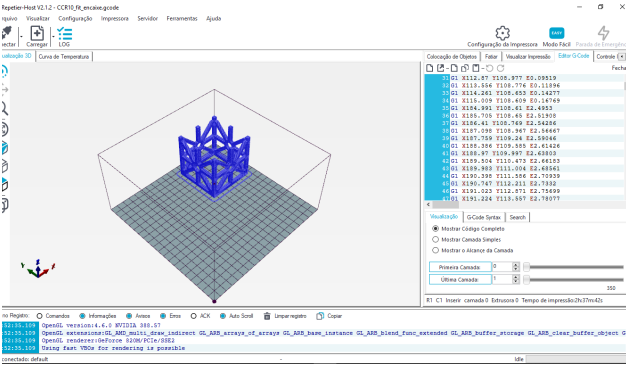
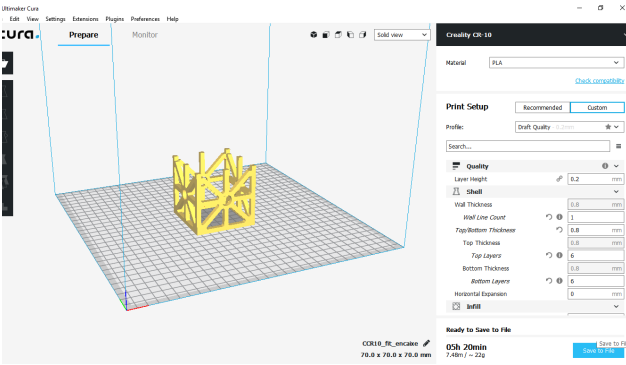
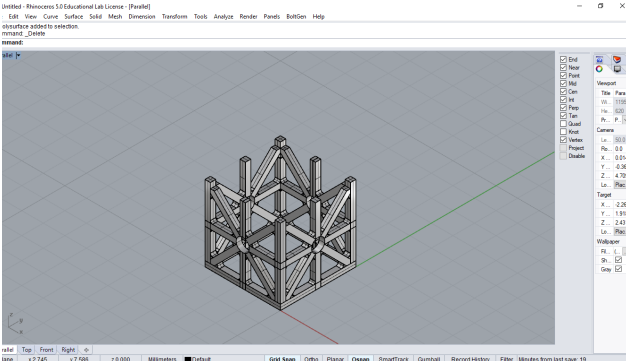


Figura 52. Frames de processo pré-protótipagem.

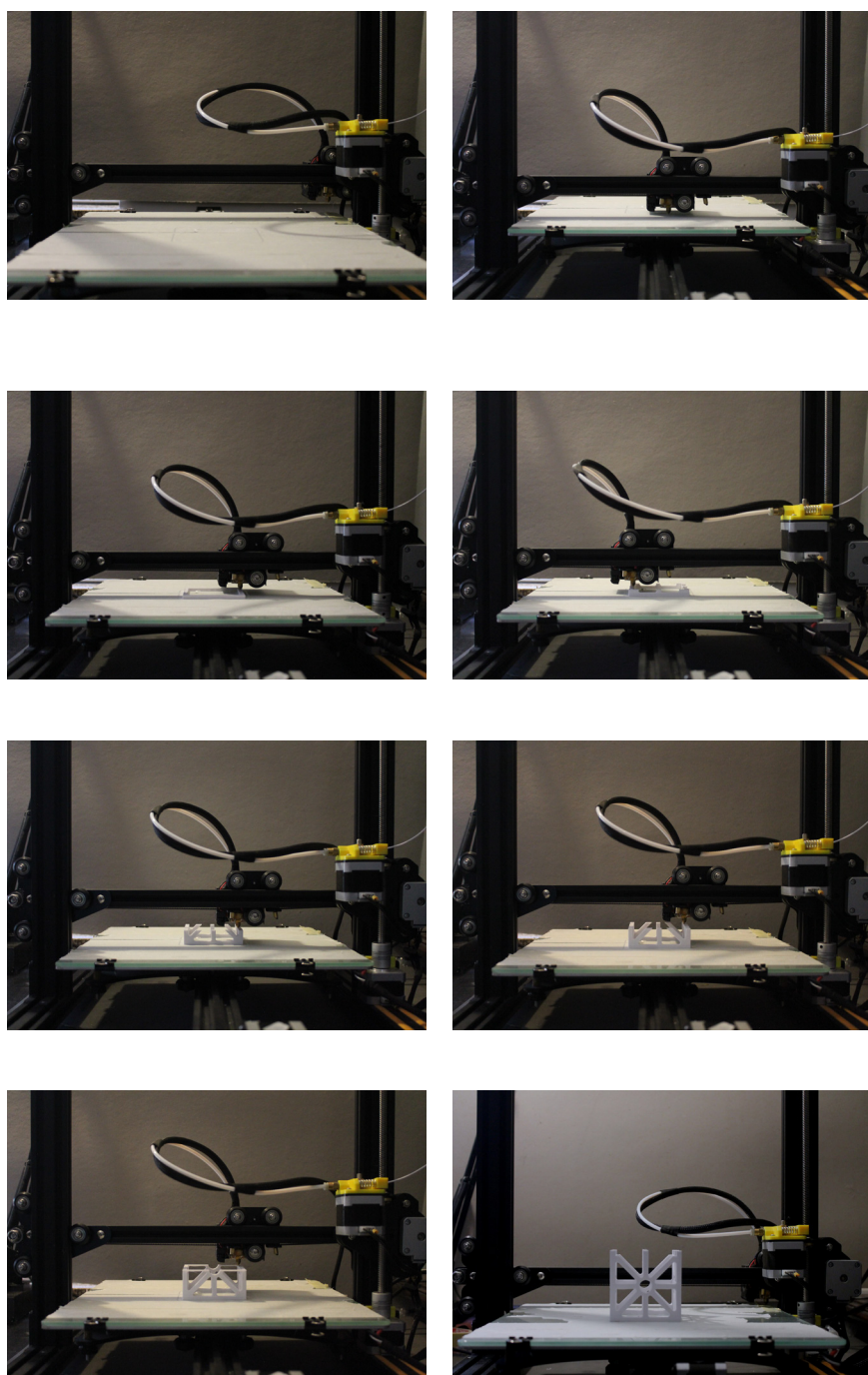


Figura 53. Prototipagem Node. Fotografia de autor.

## 3.2.3 Metal

A junta de metal, é uma ligação que pretende explorar a vantagem da facilidade de transporte e empacotamento proporcionados pela planificação, ou seja, ao se tratarem essencialmente de folhas de metal recortado, dispõem de uma espessura inferior a 0.5 milímetros, e será possível transportar grandes quantidades de ligações num espaço reduzido.

Esta ligação, destaca-se em relação aos outros exemplos estudados anteriormente, não por usar elementos ligantes como colas, mas sim ao utilizar ligações mecânicas, parafusos, como método de fortalecimento da ligação, sendo que mantem a mesma regra de promover a reutilização de todos os elementos, do mesmo modo que construções em junta seca.

No processo de produção deste tipo de ligação, utiliza-se a fresadora CNC de modo a facilitar e amplificar o processo de produção, o que permite que todas as furações e recortes sejam realizados da mesma forma independentemente do utilizador. Após este processo de corte na fresadora CNC, a ligação está na sua essência produzida. Caso ainda seja transportada para uma outra localização, deverá sê-lo neste momento devido à pequena dimensão em espessura. No momento de ser aplicada, deve então ser quinada nas linhas indicadas e aplicada no ponto de ligação correspondente, sendo finalizada com parafusos nos locais próprios, com a intenção de servir de âncora e fortalecimento da ligação.

No entanto, para o protótipo final desta investigação, não existiam ferramentas para corte de metal na fresadora CNC, pelo que o corte das peças deste protótipo foram realizadas de forma manual.

Ao seguir este tipo de ligação, propôs-se o desenvolvimento de uma ligação baseada na planificação, que se desenvolve por envolver a ligação numa capa de metal, sendo esta posteriormente planificada para produção e assim aplicada e produzida em massa, se necessário. Pode ser aplicada em viga e pilares, sendo também usada no caso de estudo como ligação entre as vigas responsáveis pela inclinação da cobertura. Denominou-se esta ligação de Planificação, sendo também esta de autoria própria.

# 3.2.3.A Planificação

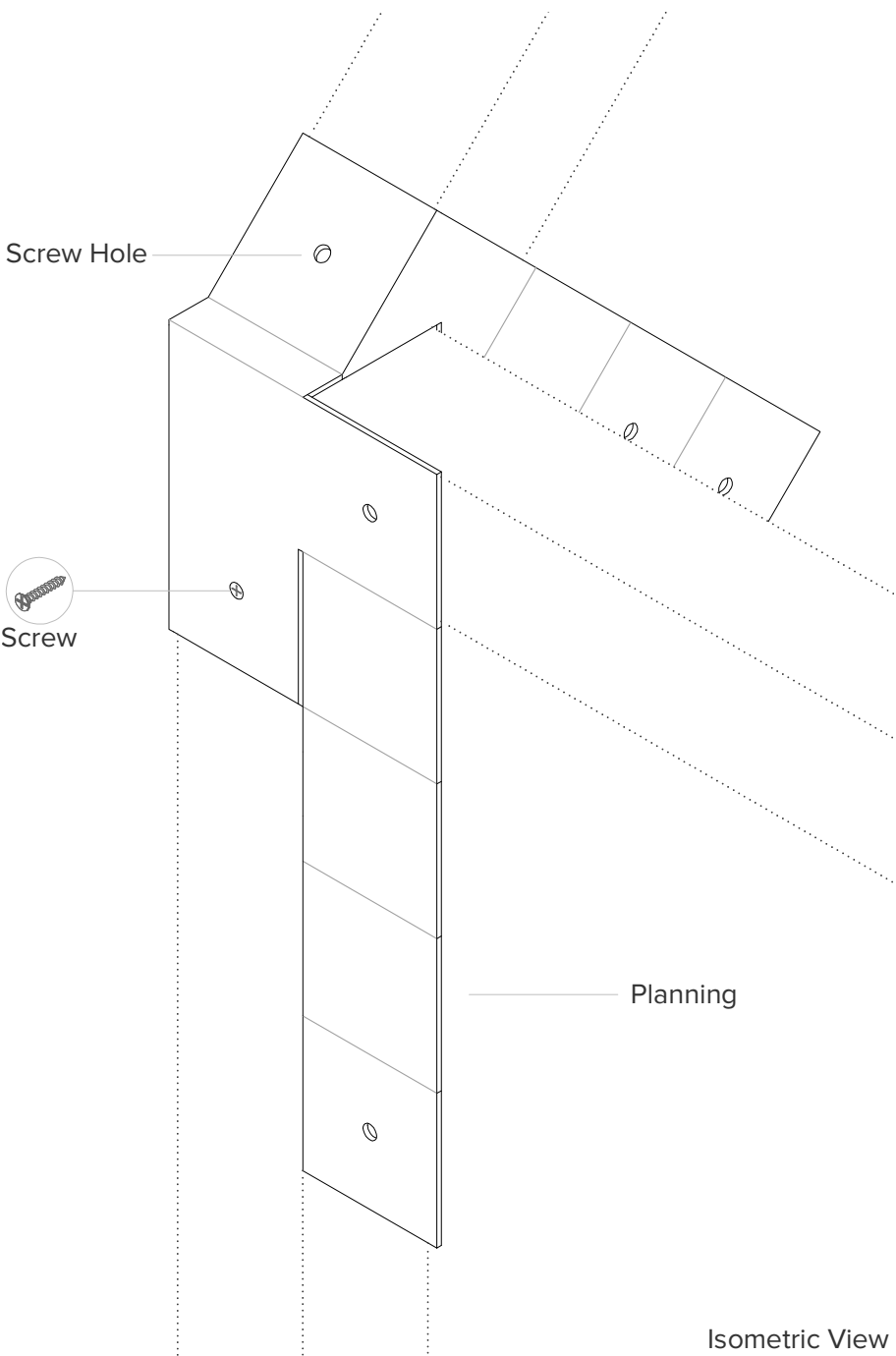


Figura 54. Vista axométrica da ligação Planificação.

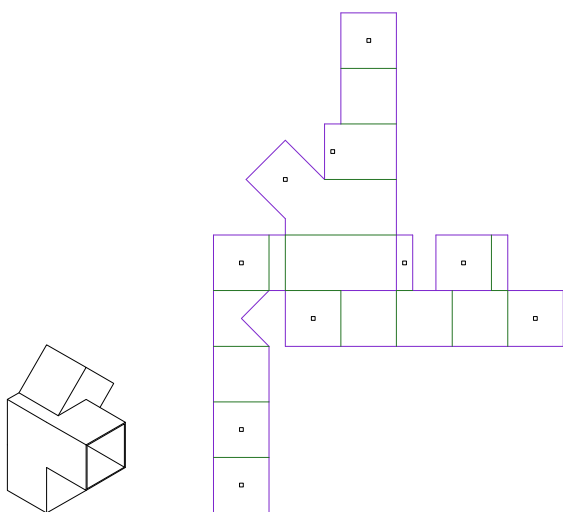
## 3.2.3.A.I Definição da ligação

A ligação de Metal, denominada Planificação, concentra-se em dois elementos: um primeiro, a ligação em si, a planificação em metal, e um outro, o parafuso que facilita a ligação.

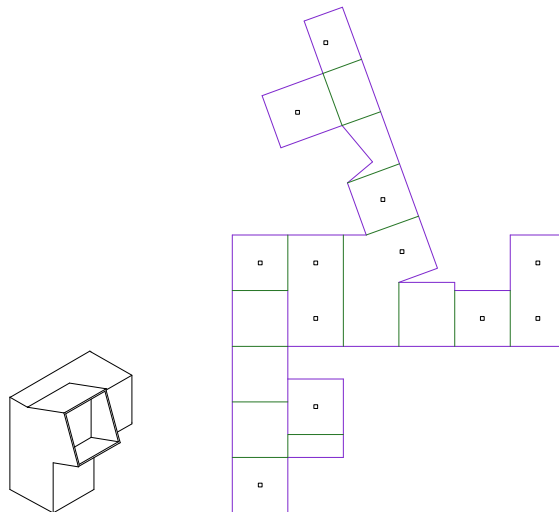
O primeiro elemento, a planificação consiste na reprodução da ligação, através de um offset à ligação que se pretende funcional. Este offset, perpendicular à ligação, com dimensão igual à espessura da folha de metal, é compreendido por duas vezes a variante *Part dimension*, numa disposição em esfera a partir da ligação, de modo a determinar as proporções e dimensões da ligação. Tem como objetivo ser um elemento que se desenvolve em torno da ligação e envolve-a numa proximidade que assegura a ligação com grande detalhe. De modo a produzir esta ligação é usada a fresadora CNC, para garantir uma produção estável e repetível.

Devido ao método de produção pela planificação, para esta ligação desenvolveu-se um método que consiste, como o nome indica, no desenho da planificação de cada uma destas ligações. Este desenho pode ser exportado para o software em uso na fresadora CNC, e é ainda também indicado o número de vezes a ser produzido.

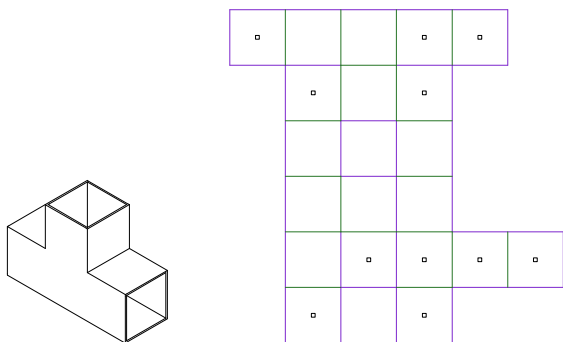
O segundo elemento, o parafuso, é o elemento responsável por assegurar uma relação pele-músculo entre o elemento de ligação, planificação, e os barrotes de madeira que se pretendem ligados. Este elemento segue as regras de corresponder em comprimento máximo  $\frac{1}{2}$  da variante *Part dimension*, e em circunferência da área roscada, um raio não inferior a 1 mm.



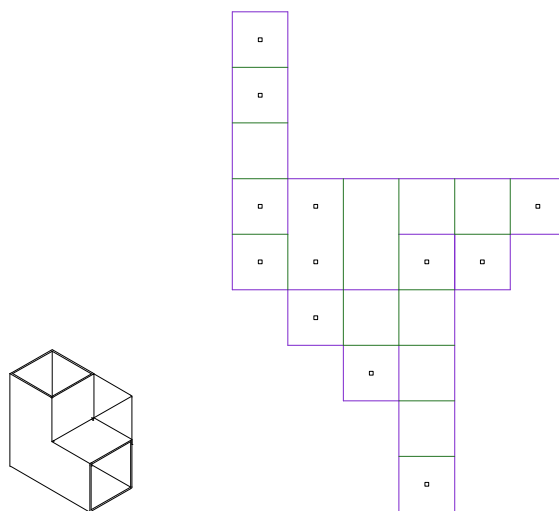
1



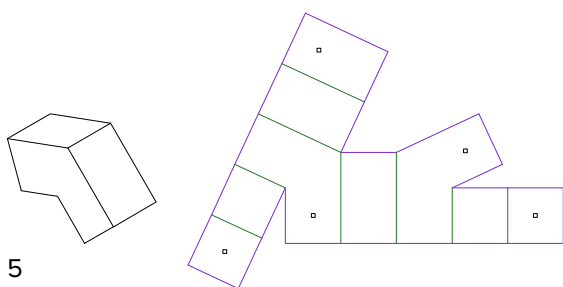
2



3



4



5

roxo = corte | verde = dobragem

Figura 55. Planificação da ligação Planificação.



## 3.2.3.A.II Código, aplicação aos pontos

Para a elaboração do modelo, através do *Grasshopper*, identificou-se o ponto representativo das ligações, (P1nm, P2nm, P3nm, P4nm e P5nm). A partir destes, desenvolvem-se há semelhança das outras ligações três componentes que resultam na construção desta ligação.

O primeiro componente, Planificação, parte num primeiro passo da determinação do ponto representante da ligação a ser planificada. A partir deste e da sobreposição dos barrotes de madeira, selecciona-se uma distância de duas vezes igual à variante *Part dimension*. Nestas faces realizam-se offsets de cada uma das faces dos barrotes, perpendicularmente às mesmas e de distância igual à espessura da chapa de metal que se pretende como material base para a ligação. Na interceção de cada uma das faces entre si, são determinadas linhas que no seu total servem de base para o desenho da ligação. Estas linhas desenharam superfícies, que por sua vez, quando extrudidas, em direção perpendicular às mesmas, seguindo para os barrotes e com a mesma espessura do material, delineiam a totalidade da ligação.

Num segundo passo, e a partir de uma ideia de planificar e quantificar a ligação, cada uma destas ligações é desconstruída segundo o princípio de planificação que prevê linhas de corte, linhas de dobragem, pontos para furações e faces de sobreposição para reforço da ligação, sendo cada uma destas desenhada num ponto específico pertencente ao plano horizontal de referência. Após o desenho desta planificação, é definido um elemento que contabiliza cada uma destas ligações, indicando simultaneamente em cada uma das planificações quantos elementos desta mesma se encontram em uso no módulo.

O segundo componente, parafuso, como elemento responsável pela ligação entre a Planificação e o barrote de madeira, apenas deverá seguir as diretivas do seu comprimento não ser superior a  $\frac{1}{2}$  da variante *Part dimension*, e em secção da área roscada não ser inferior a 1 mm. É apenas indicado que estes parafusos devem ser para uso em madeiras.

Devido à complexidade do código produzido para esta ligação, não é possível a apresentação gráfica de forma clara do mesmo.

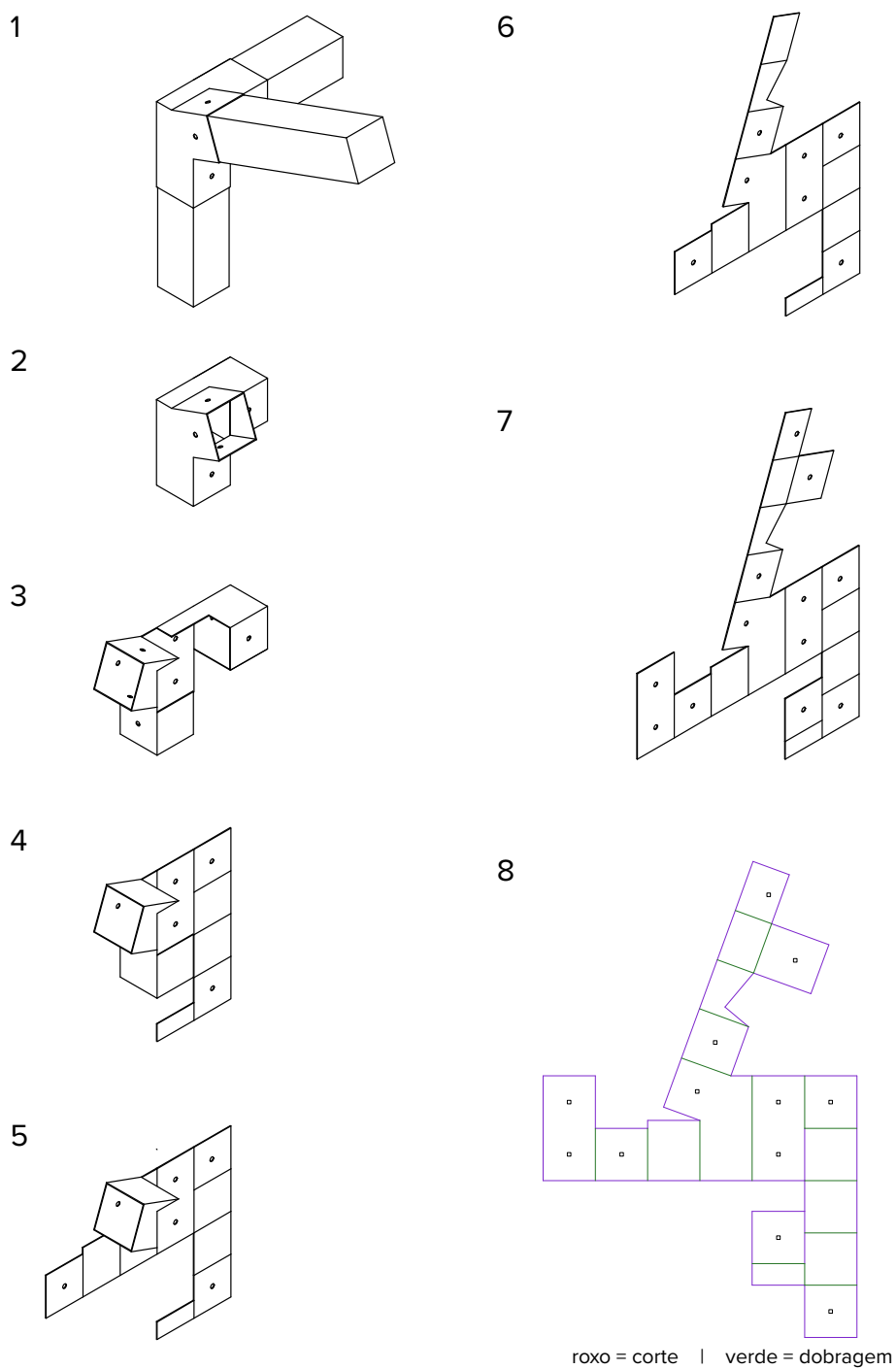


Figura 56. Esquema de desenvolvimento Planificação, com base nas regras do código.

### 3.2.3.A.III Prototipagem

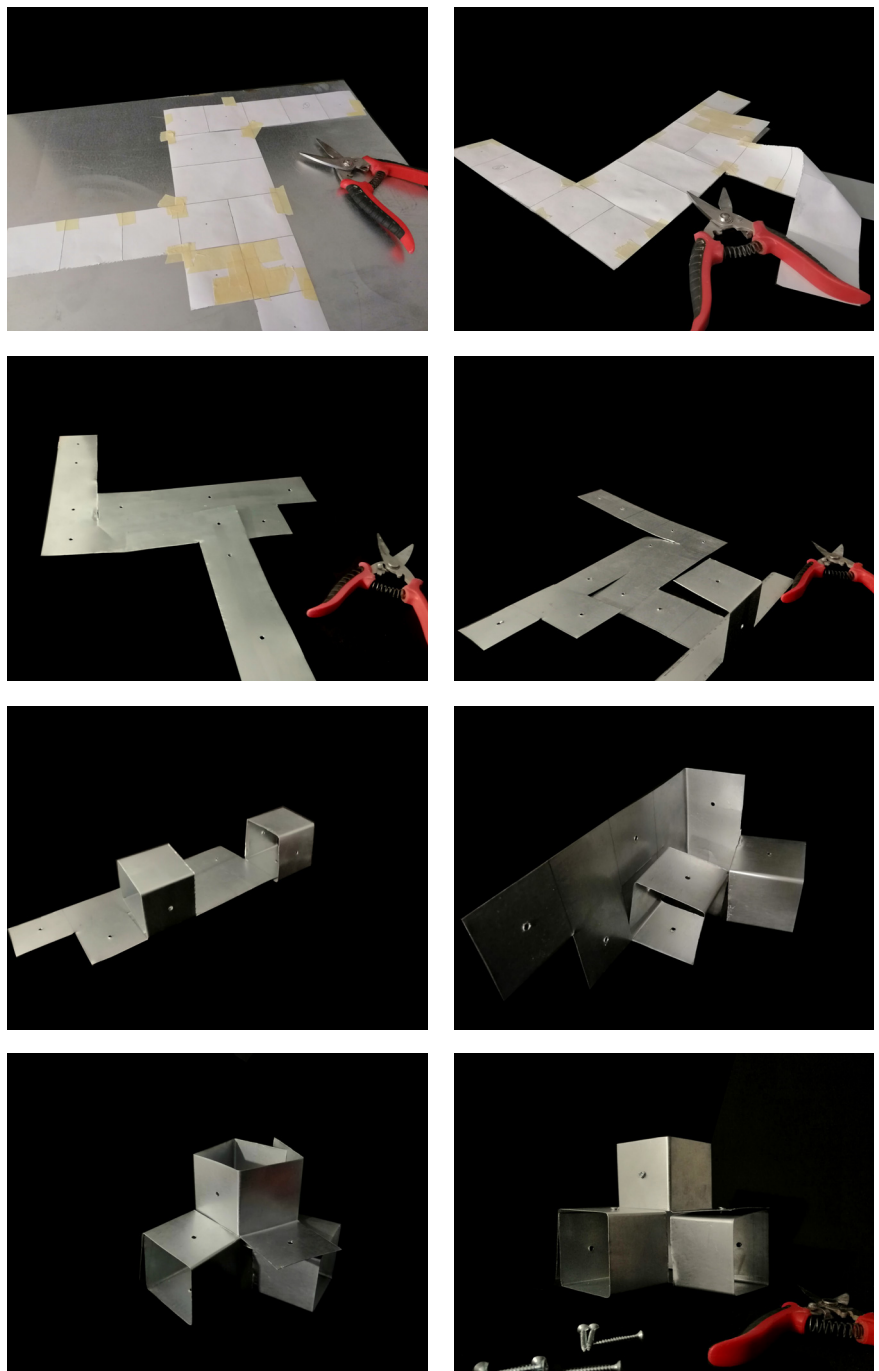


Figura 57. Prototipagem Planificação. Fotografia de autor.

## **4. Proposta: três pórticos, três ligações**



# 4.1 Processo de desenho, fabrico e construção

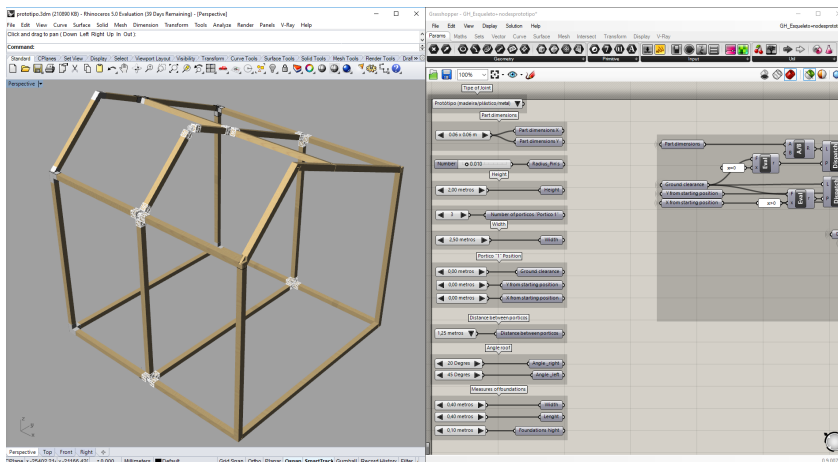


Figura 58. À esquerda, a interface gráfica do *Rhinoceros*, apresenta a solução gerada em função dos parâmetros definidos em *Grasshopper*. À direita, a interface gráfica do *Grasshopper*, apresenta as variantes que definem o sistema de projeto do protótipo.

Na elaboração desta investigação, como referido inicialmente, considerou-se que seria de interesse o desenvolvimento de um protótipo à escala real que inclui os três tipos de ligação estudados.

Para tal, desenhou-se através do sistema de projeto, código, um conjunto de três pórticos com as dimensões 2,50 metros de largura (*Width*) e 2 metros de altura (*Height*) nas extremidades dos pórticos. Para a cobertura utilizou-se uma cobertura inclinada, com ângulos de 20° e 45° (respetivamente *Angle\_left* e *Angle\_right*), o que acrescentou 1 metro à altura total dos pórticos. A distância entre cada um dos três pórticos respeita os 1,25 metros referidos anteriormente, para facilitar um possível revestimento com placas de OSB. Ainda no desenho dos pórticos, a variante Part dimension assume o valor de 0,06x0,06 metros, ou seja, considerou-se o uso de barrotes de madeira de secção quadrangular de 0,06 metros e para as ligações a dimensão base de desenho de 0,06x0,06x0,06 metros.

Após o desenho deste módulo, criou-se uma listagem dos materiais necessários para a sua construção. Esta listagem para além do número de barrotes, também contabiliza o número de ligações e a respetiva identificação dos elementos necessários à construção de cada uma das ligações.

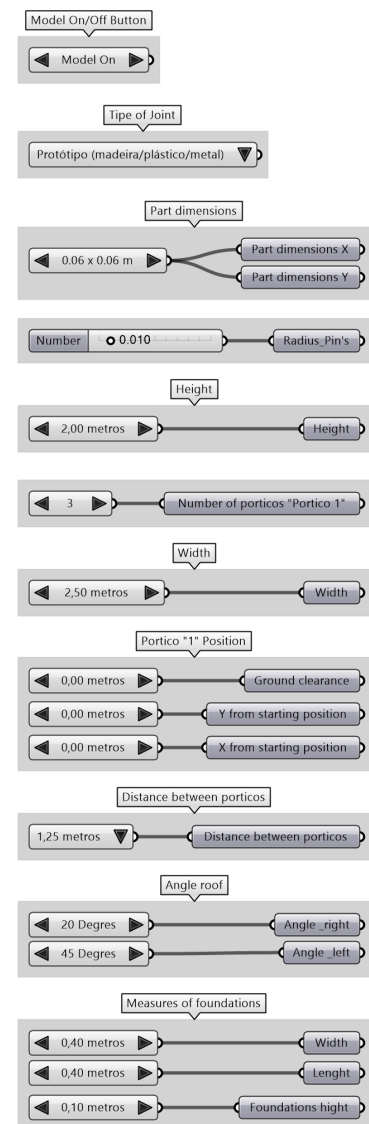


Figura 59. As variantes que definem o sistema de projeto do protótipo.

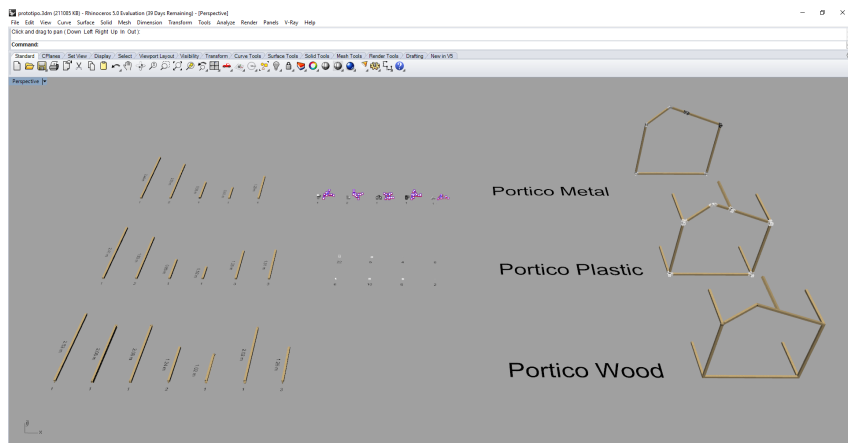


Figura 60. Elementos necessários ao projeto do protótipo.

Para a o fabrico deste protótipo é necessário um total de 18 barrotes de madeira, sendo que foram adquiridos barrotes com as dimensões de 0.06x0.06x2.60 metros. Enquanto alguns dos barrotes foram apenas acertados na sua extensão para a correta aplicação, os restantes barrotes foram cortados de modo a obter a extensão adequada à respetiva parte do pórtico.

Os restantes elementos do protótipo, como as ligações, foram listados numa tabela, respetiva ao seu tipo de ligação, de modo a informar para além da quantidade de peças, o tempo despendido para a sua concretização. Na tabela respetiva à ligação de plástico também se contabilizou o filamento necessário para o fabrico de cada uma das peças.


















Tabela de tempos e quantidades Pórtico Madeira				
Nome	Peça	Tempo (min)	Quantidade	Tempo total (min)
4 Pinos		18	2	36
U/Π		16	5	80
2 Half (center)		22	2	44
2 Half		14	4	56
Roof		16	2	32
Total			15	248 (aprox. 4 horas)

Tabela de tempos e quantidades Pórtico Plástico						
Nome	Peça	Tempo (min)	Filamento (g)	Quantidade	Tempo total (min)	Filamento total (g)
Node		190	36	6	1140	216
Fit Cap.		210	45	22	4620	990
Cap. Normal		80	22	10	800	220
Cap. Extend		100	26	6	600	156
Cap. Rotation		75	19	6	450	114
Rotation		20	2	6	120	12
Pin		1	0.1	6	6	0.6
Total				62	7736 (129 horas)	1708.6 (1kg e 709g)

Para as ligações do pórtico de metal, o tempo indicado refere-se a fabrico manual, já que a quando da elaboração da tese, não existiam ferramentas para corte de metal na fresadora CNC, como descrito no subcapítulo 3.3.

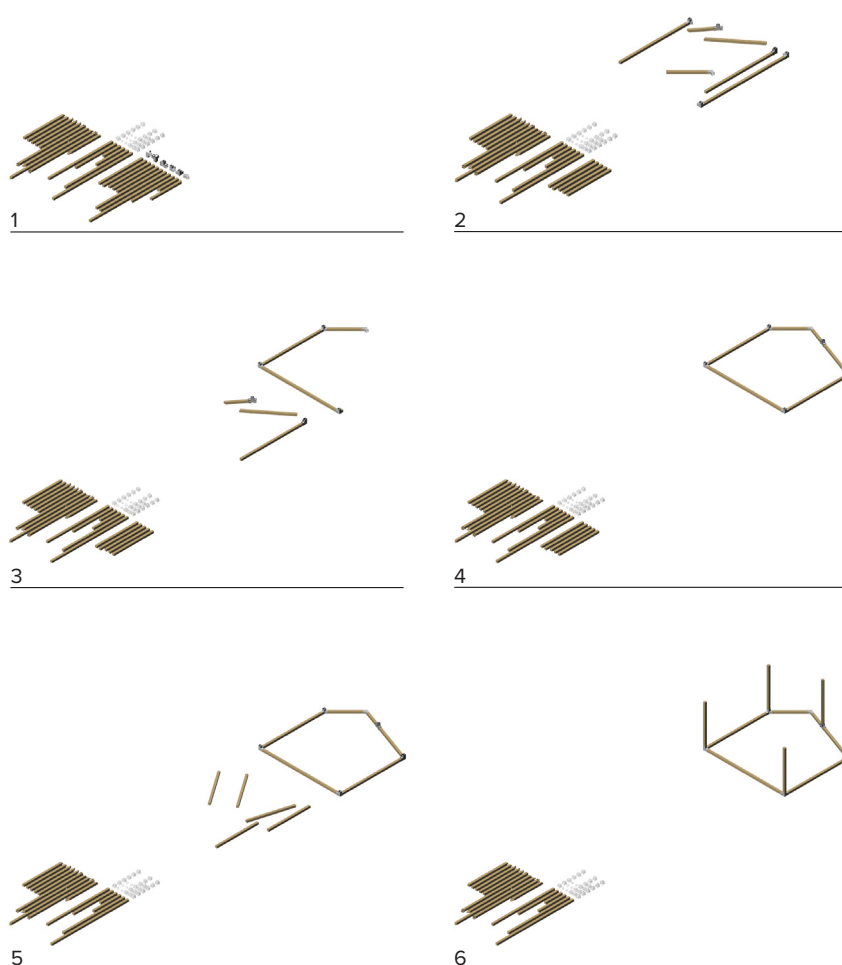
Tabela de tempos e quantidades Pórtico Metal				
Nome	Peça	Tempo (min)	Quantidade	Tempo total (min)
1		75	1	75
2		60	1	60
3		45	1	45
4		40	2	80
5		20	1	20
Total			6	280 (aprox. 5 horas)

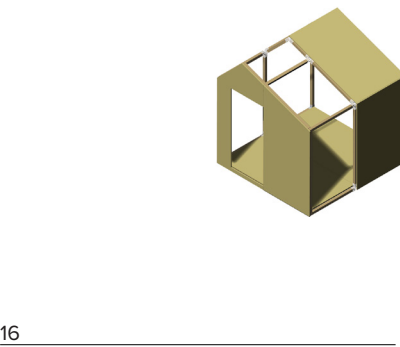
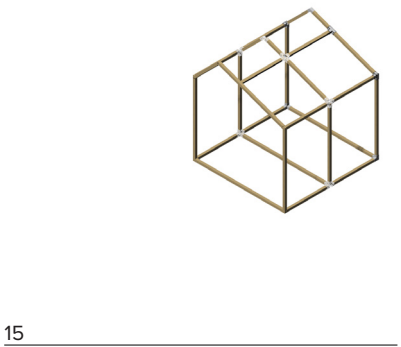
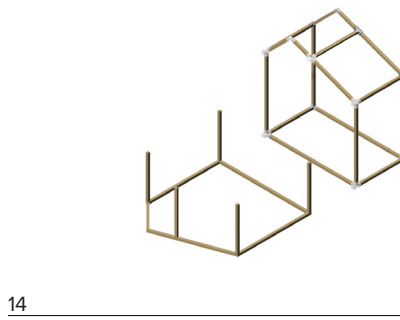
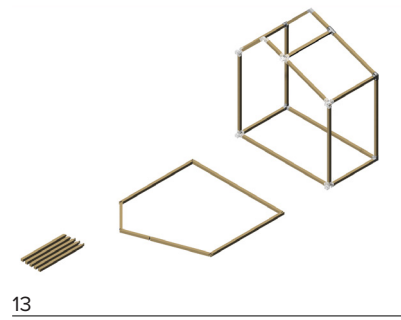
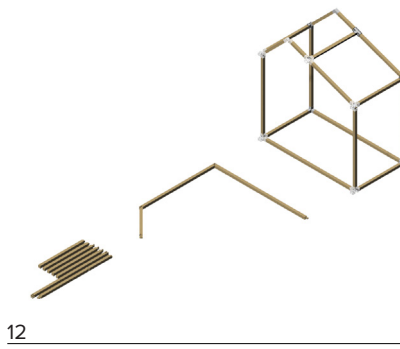
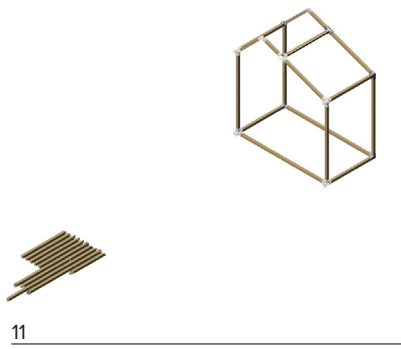
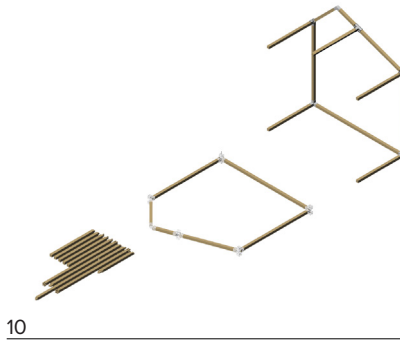
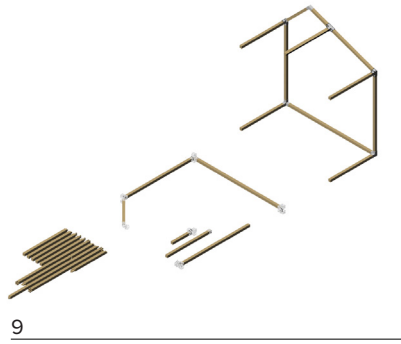
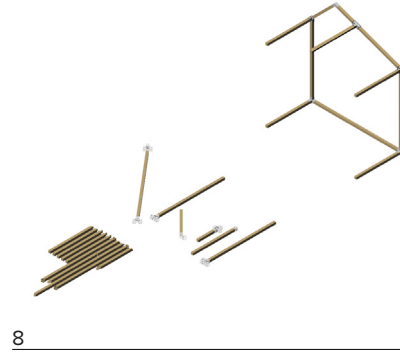
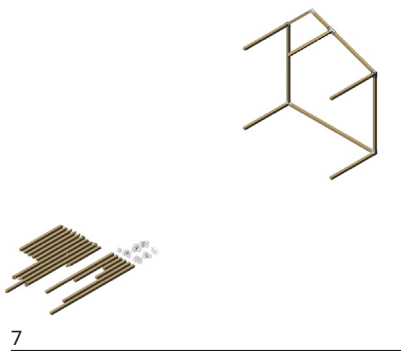


Numa primeira fase, desenvolveu-se um diagrama do processo para a construção do protótipo, ou seja, os passos necessários para uma fácil ligação das partes de modo a obter o conjunto dos três pórticos. Neste esquema propõe-se ainda a fixação de painéis de OSB pelo exterior de modo a permitir proteção e reforço para o módulo (apesar desta última parte não ser explorada na realização do protótipo).

No seguimento do desenvolver do diagrama considerou-se que todos os elementos de ligação já teriam sido fabricados. A ordem de trabalhos partiria pela fixação das ligações aos respetivos barrotes de madeira. De seguida unem-se os barrotes com as ligações do pórtico de metal e, a este une-se as vigas que o ligam ao pórtico de plástico. A partir destas constrói-se o pórtico de ao qual se unem as vigas de ligação entre o pórtico de plástico e o pórtico de madeira. Para finalizar o protótipo juntam-se as partes do pórtico de madeira, obtendo assim o conjunto dos três pórticos. Como referido anteriormente, no diagrama também se adicionaram elementos de revestimento aos pórticos, neste caso, placas OSB.

Figura 61. Processo de construção do protótipo final, segue a ordem crescente dos esquemas.



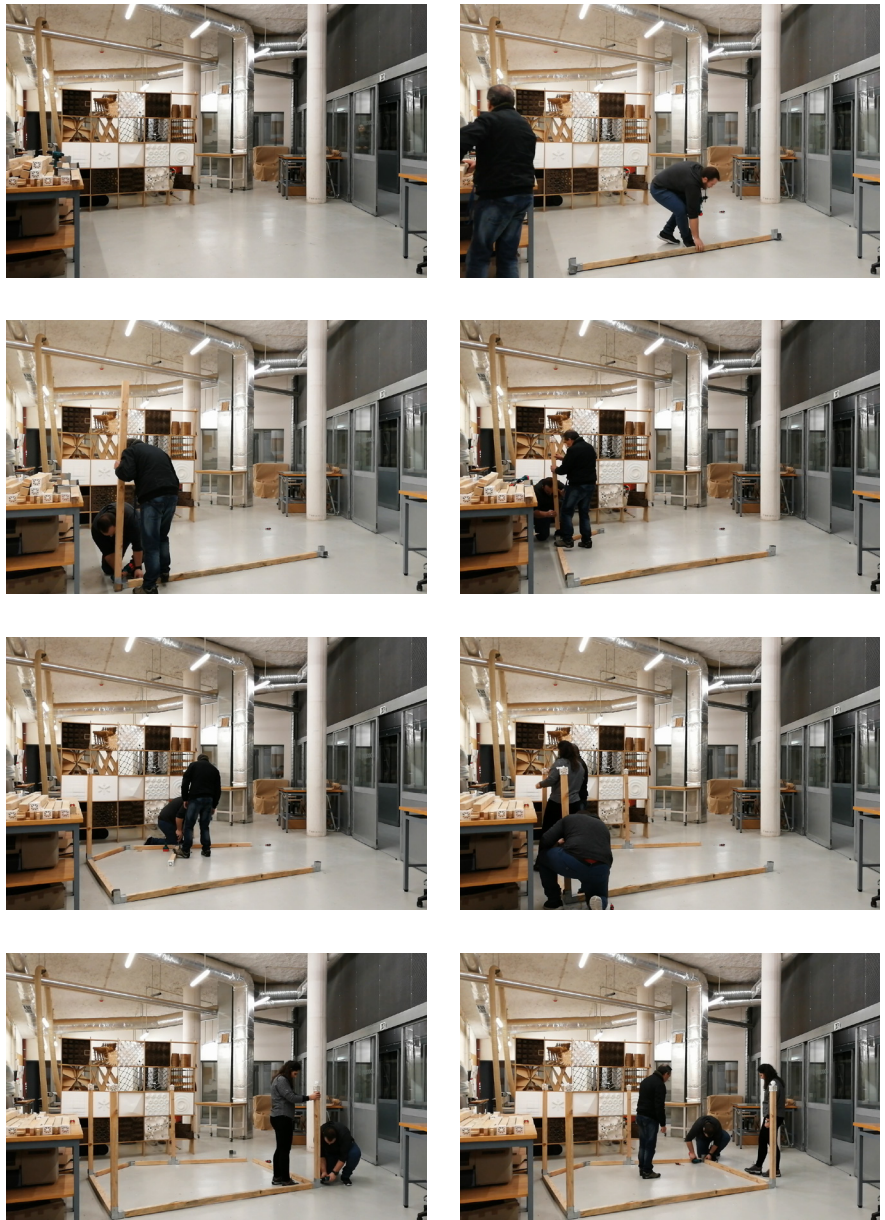


Numa segunda fase, após o desenvolvimento do diagrama de montagem, procedeu-se à montagem do protótipo à escala 1:1 utilizando os elementos de ligação já produzidos nos subcapítulos correspondentes às ligações madeira, plástico e metal.

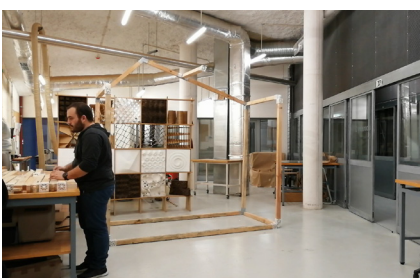
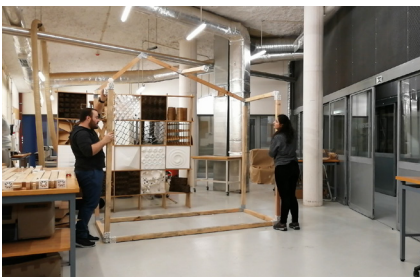
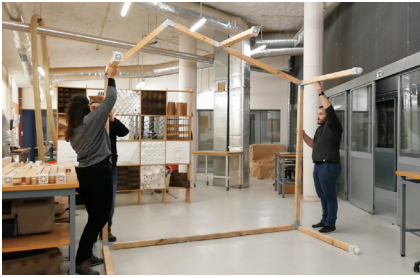
As próximas fotos documentam a construção do protótipo, que tentou seguir o diagrama anteriormente produzido. No momento da construção foi necessário tomar decisões que acabaram por se diferenciar do que foi proposto no diagrama. O processo de montagem dos pórticos que se idealizou de forma independente para posteriormente uni-los de modo a formar o conjunto dos três pórticos, na construção à escala 1:1, realizaram-se dois pórticos (metal e plástico) agregados em primeiro lugar na posição horizontal, e apenas quando elevados numa posição vertical uniu-se o pórtico madeira, pois devido à fragilidade nos elementos da ligação plástico, foi necessário adaptar e continuar a construção.

Segue assim o processo de construção do protótipo

Figura 62. Construção do protótipo final, escala 1:1. Segue a ordem crescente dos esquemas.













No desenvolver do protótipo surgiram algumas dificuldades de construção e ao mesmo tempo perceberam-se certas fragilidades nas ligações.

Inicialmente, pensou-se que seria mais simples construir cada pórtico de forma individual e posteriormente uni-los. Sendo que ao proceder deste modo as ligações entre pórticos, a subestrutura, encontram-se sem suporte até o pórtico seguinte ser colocado, pelo que foi necessário construir os dois primeiros pórticos (metal e plástico) na posição horizontal, com as ligações entre ambos já realizadas e apenas após a rotação dos mesmos para a posição vertical, foi adicionado o pórtico de madeira.

Compreendeu-se também que a ligação de madeira foi a ligação que foi produzida de forma mais rápida, seguida pela ligação de metal, apesar de que para o protótipo esta ter sido fabricada manualmente. A ligação de plástico é a que necessita de mais tempo de produção, já que este está ligado à velocidade de produção da máquina. Esta mesma ligação revelou fragilidades devido a uma relação débil entre o desenho e o material em que a mesma foi produzida.

No desenho da ligação de plástico, a resistência dos elementos Cap, normal e Cap. extend, que ligam ao Node, revelou-se pouco capaz, já que quando se encontra sob pressão e devido a uma falta de distribuição de cargas, este elemento falha e deixa de cumprir o seu propósito. Para corrigir este problema seria necessário considerar um reforço do desenho da peça, onde se poderiam reconsiderar métodos de

ligação ou optar pelo fabrico num outro material, como por exemplo o metal, sendo que se procuraria manter o mesmo método de fabrico, isto é, pelo fabrico aditivo através da fundição de um material.

Ao contrário da ligação de plástico, as ligações de madeira e de metal revelaram-se capazes de suportar todos os elementos do habitáculo sem sofrer qualquer dano.

Tendo em conta que o protótipo não reflete completamente uma proposta de habitáculo, desenvolveu-se um modelo de pórtico, estudado em proposta cada um dos tipos de ligação de forma independente, onde se pensaram máquinas necessárias, materiais, tempos de produção e, também o espaço necessário e organização para transporte.

Para uma proposta de habitáculo, foi considerado no desenvolvimento do sistema de projeto a necessidade do desenho de módulos com funções especializadas, como casa de banho, cozinha, quarto, para agilizar o processo de desenho e construção dos mesmos. Estes módulos poderiam ser agregados de diferentes formas, com a visão de promover a adaptabilidade e personalização.

O revestimento do habitáculo foi considerado desde o início do desenvolvimento do sistema de projeto, já que este influenciou a métrica da distância entre pórticos. Foi considerado um revestimento em placas OSB, com medida standard de 1,25 metros de largura, que consequentemente resultou na dimensão da variante Distance Between Porticos. Também seria possível o revestimento com telas.

A métrica da subestrutura do habitáculo foi pensada para receber vãos de forma livre, apenas teria de considerar a estrutura principal dos pórticos, que não pode ser seccionada.

Conjunto de elementos, como variantes, eixos, ligações, agregados ao revestimento resulta num habitáculo, adaptado e personalizado pelo utilizador.



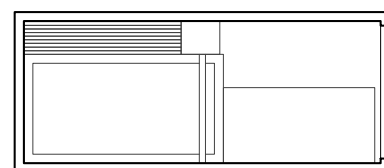
## 4.2 Simulação de Transporte e Fabrico

Neste subcapítulo, procedeu-se a uma simulação de uma proposta para um habitáculo, visto que o protótipo não representa em si uma hipótese de habitáculo mas sim uma exemplificação do trabalho explorado na investigação.

Assim, propõe-se um módulo com dimensões 2,5 metros de largura, 5 metros de comprimento, 2 metros de altura na parte baixa e 2,5 metros na parte alta (considerou-se uma dimensão de ligação de 0,06 x 0,06 x 0,06 metros.), para exemplificar tempos de fabrico e dimensões de transporte.

Como elementos de construção para esta simulação seriam necessários 28 barrotes de madeira para a estrutura principal e uns adicionais 28 para a subestrutura. Seria aconselhado que fossem adquiridos barrotes extras como forma de garantia para eventuais erros de produção. Caso as ligações fossem fabricadas através da ligação madeira x madeira seriam necessários 140 partes de ligações, ou seja, 140 desbastes na fresadora CNC (num total de 45 horas de fabrico). No caso do uso de ligações em PLA seria necessários 8 kg de filamento (130 peças, com um total de 598 horas de fabrico). Já no caso do metal seriam necessárias 30 folhas de metal, de dimensão 0,6 x 0,6 x 0,001 metros (total de 30 folhas de metal, com um tempo de cerca de 50 min por folha, ou seja, um total de 25 horas para o fabrico de 30 peças, não incluído tempo de aplicação já que este é variável). Seriam ainda também necessárias 25 placas de OSB de 1,25 x 2,50 x 0,02 metros, como revestimento para o módulo.

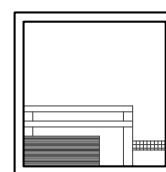
Para construção, seria necessário uma fresadora CNC, e uma máquina de fabrico aditivo (com um maior número de máquinas, o fabrico será mais rápido). Para exemplo, foi considerada a fresadora CNC, “Intelitek CNC Router, ProRouter 5’x10’”, com dimensões de zona de corte de 3 metros de comprimento por 1,50 metros de largura (com o objetivo de poder desbastar encaixes nas placas de OSB) e que em transporte necessitaria de um volume de 3,30 metros de comprimento, por 1,80 metros de largura, por 1,5 metros de altura. Para a máquina de fabrico aditivo, foi considerada a Impressora “Creality3D CR-10” por ser uma máquina com uma boa relação custo qualidade, com uma área de fabrico de 0,30 x 0,30 x 0,40 metros. Para o transporte a máquina pode ser desmontada em parte para facilitar o mesmo, pelo que apenas necessitará de 0,64 x 0,53 x 0,27 metros para ser transportada.



Planta do contentor com elementos necessários para a construção do módulo.



Corte longitudinal do contentor com elementos necessários para a construção do módulo.



Corte transversal do contentor com elementos necessários para a construção do módulo.

Figura 63. Planta e cortes, esquema de transporte.



Tabela de tempos e quantidades PLA					
Peça	Tempo (min)	Filamento (g)	Quantidade	Tempo total (min)	Filamento total (g)
Node	190	36	30	5700	1080
Fit Cap.	210	45	100	21000	4500
Cap. Normal	80	22	40	3200	880
Cap. Estend	100	26	40	4000	1040
Cap. Rotation	75	19	20	1500	380
Rotation	20	2	20	400	40
Pin	3	0.1	20	60	2

Total	270	35860	7922
-------	-----	-------	------

Total   Horas e kg	270	597 horas e 40 min	7 kg e 922 g
--------------------	-----	--------------------	--------------

Tabela de tempos e quantidades Madeira x Madeira			
Peça	Tempo (min)	Quantidade	Tempo total (min)
4 pinos	18	10	180
U	16	40	640
Π	16	40	640
2 half (center)	22	30	660
2 half	14	30	420
Roof	16	10	160

Total	140	2700
-------	-----	------

Total   horas	140	45 horas
---------------	-----	----------

## 5. Conclusão



## 5.1 Considerações finais

Este capítulo procura sintetizar as questões, os problemas e as opções que foram consideradas e abordadas ao longo desta tese, ao mesmo tempo, assume-se como um resumo de conhecimentos e técnicas adquiridas na elaboração da mesma.

A partir da curiosidade inicialmente demonstrada por uma arquitetura de necessidade, pelo desenho através de sistemas computacionais e pelo detalhe da ligação, estudou-se um módulo que se desenvolve em torno das ligações, com o intuito da reversibilidade e adaptabilidade do próprio módulo. Estes conceitos pensam-se importantes para o desenvolvimento deste tipo de arquitetura.

Pensou-se o desenvolvimento deste módulo através de desenho computacional, onde para tal se usou o software Grasshopper. Foi desenvolvido um código, que funciona como uma ferramenta que permite aplicar os conhecimentos adquiridos e através do mesmo adaptar e personalizar o módulo. O código foi algo complexo de desenvolver e para tal decidiu-se uma divisão em três partes. Uma primeira que se nomeou Esqueleto, responsável pelo desenho em forma de eixos, de todo o módulo, permitiu identificar pontos de interceção (ligações) e os eixos (beam, barrotes de madeira). A segunda parte, as ligações, que englobam a maioria do trabalho, pois o mesmo desenvolve-se em torno da reutilização dos elementos do módulo e que sem uma junta que o permitisse, os resíduos seriam superiores aos elementos aproveitados. A terceira parte são as beam, os barrotes de madeira, onde se desenvolveram as vigas e os pilares, que se uniram às ligações e assim, em conjunto com painéis exteriores (OSB, telas ou painéis de vidro) obtém-se o módulo.

Um dos elementos centrais do desenvolver desta tese foram as ligações, e como se trata de um elemento de detalhe foi-lhe dada uma maior atenção.

As ligações que provêm da adaptação das ligações desenvolvidas na carpintaria japonesa são aquelas que sofreram menores alterações, já que devido ao seu uso ao longo dos séculos, as mesmas já se encontram otimizadas. Apenas se decidiu a repartição de certos elementos como na ligação 4 pinos, onde devido ao desenho da mesma, esta não prevê a sua utilização como ligação entre pórticos, pelo que foi necessário dividir uma parte da ligação ( $U$  e  $\pi$ , que foram divididos ao meio para que a utilização contínua dos mesmos fosse

possível). Na ligação 2half, um dos elementos pertencentes ao eixo X, foi rodado para Y, de modo a permitir que esta mesma ligação fosse usada para conectar a subestrutura entre pórticos e as respectivas paredes aos pilares. A ligação roof é constantemente adaptada, já que o seu desenvolvimento depende principalmente da inclinação da cobertura (no caso da utilização de uma cobertura plana esta ligação não existe).

No desenvolver da ligação node (ligação através de plástico), optou-se pela utilização de um sólido semelhante há esfera, pela sua característica de resistência e com a intenção de maximizar o número de conceções que a mesma poderia compreender. Utilizou-se assim o octógono como base, já que este permite ligar em 8 ligações ao mesmo tempo, (respeita entre cada uma das faces um ângulo de 45°, algo necessário para facilitar o fabrico das mesmas através de FFF). O octógono foi rodado em X e Y de modo a desenhar um rombicuboctaedro, sendo que este foi recortado em 6 faces de modo a desenvolver a possibilidade de rotação, ou seja, permite que no momento da ligação das peças de encaixe ao node, estas possam girar em torno de um eixo e assim compreender um maior número de ângulos (pensou-se para a utilização na cobertura, devido à sua inclinação variável).

Ainda nas ligações, a ligação metálica foi pensada de um modo diferente, devido à característica da planificação (desdobrar de um sólido), optou-se por desenvolver a ligação como interseção dos barrote de madeira (a um nível puramente visual) e a partir do centro desta interceção, com uma medida determinada nas variantes, desenrolou-se a mesma, ou seja, planificou-se a ligação que resultou numa ligação “irreconhecível” até envolver novamente a interseção e torna-se nesse momento a ligação. Quando se desenvolveu a prototipagem desta ligação rapidamente se percebeu que é necessário ter em atenção a espessura da chapa de metal, ou seja, se for muito fina (<0.1mm) a ligação não terá resistência, se a chapa for muito grossa (>1mm) a dobragem da planificação será mais complicada ou até mesmo inviável.

No desenvolvimento dos protótipos existiu um tempo de aprendizagem, tecnologias como a CNC e a Impressão FFF, exigiram tempo de afinação e acerto de tolerâncias, quer nas máquinas quer no desenho de cada peça. No fabrico através da CNC e para que os elementos da ligação madeira pudessem ser conectados da melhor forma, foram realizados testes de afinação e dimensionamento. Deste modo, foi dada uma especial atenção à ordem de corte e movimento da máquina, de maneira a priorizar linhas e movimentos retos e contínuos. Com o uso da impressora FFF foi dada atenção aos ângulos de fabrico, já que a impressão sem suporte de elementos horizontais está restringida a elementos muito pequenos. Certas peças como a “rotation part” ou a “static part”, foram separadas em 2 elementos, um primeiro (caixa) que é fabricado diretamente sem a utilização de suportes devido a ângulos que não ultrapassam os 45° ao plano horizontal e o segundo (tampa da caixa) que é fabricado sobre a cama de impressão e desta forma dispensa suportes (permite a poupança de filamento e a consequente poupança monetária). Mais tarde, estes dois elementos serão unidos através de encaixe por fricção e formam, assim, uma só peça.

Em suma, o processo de desenvolvimento desta tese, passou por pesquisa, determinação de ligações, desenvolvimento do código, experimentação e prototipagem. Estes processos foram sendo desenvolvidos ao mesmo tempo, o que permitiu uma constante adaptação e aprendizagem com os elementos que continuamente foram adicionados, corrigidos e adaptados.

## 5.2 Considerações futuras

Este capítulo procura levantar questões e alternativas ao que foi desenvolvido nesta tese e que poderiam vir a ser consideradas no futuro.

Em primeiro lugar, pensa-se que seria interessante a continuação do código. Adicionar novos elementos como a contagem e catalogação de todos os elementos e ligações ao código, para que pudessem ser construídas fichas dos elementos necessários (quantidade e identificação de ligações, madeira e painéis), desenvolver ficheiros para desbaste de madeira, furação de metal ou fabrico FFF, a partir do código. Ainda a limpeza de certos elementos no código, para melhoria na performance e no desempenho do mesmo.

Em segundo lugar, considera-se a ideia de adaptar o código a uma plataforma online como por exemplo, um website de modo a poder fazer chegar a este tipo de construção e produção a um maior número de pessoas.

Em terceiro lugar, quanto às peças fabricadas em plástico (PLA), pensa-se que a exploração de novos materiais como ABS ou até mesmo fabricação aditiva de metal poderia melhorar a resistência e comportamento da ligação “Node”.

Em último lugar, pensa-se que o teste de carga e resistência das diferentes ligações e, também a exploração de diferentes tipos de subestruturas, pode melhorar e consolidar o módulo numa nova perspetiva.

## 6. Bibliografia





Aitcheson, Robert; Friedman, Jonathan; Seeböhm, Thomas; "3-Axis CNC Milling in Architectural Design", in International Journal of Architectural Computing vol. 3, no. 2.

Benrós, Deborah; Duarte, José P.; Branco, Fernando; "A System for Providing Customized Housing", in International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures, Sydney, 2007.

Bevilacqua, M. G.; "Alexander Klein and the Existenzminimum: A 'Scientific' Approach to Design Techniques", in Nexus Network Journal, 13 no.2, 2011.

Bresegghello, Luca; "A Performative Approach to 3D Printed Architecture", Bachelor in Science of Architecture, Politecnico di Milano. Facoltà di Architettura e Società, Italy, 2014.

Budig, Michael; "Design of Robotic Fabricated High Rises - The High Rise Test Bed", in FCL Magazine, no.1 Singapura, 2013.

Carmo, Mario; "The Digital Turn in Architecture", United Kingdom, John Wiley & Sons Ltd., 2013.

Duarte, J.P.; "Customizing Mass Housing: A Discursive Grammar for Siza's Malagueira Houses", Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 2001

Duarte, J.P.; "Synthesis Lesson - Mass Customization: Models and Algorithms", Lisbon, Portugal: Technical University of Lisbon, 2008

Górczyński, Michał; Rabiej, Jan; "Digital Master Builder: From 'Virtual' Conception to 'Actual' Production through Information Models", in Respecting Fragile Places, 29th eCAADe Conference Proceedings, Eslovenia, 2011.

Granadeiro, V., Sass, L. & Duarte, J.P.; "Digitally Fabricated Building System for Customized Housing: The case of Post-earthquake Haiti", Proceedings of 1st International Conference on Sustainable Intelligent Manufacturing, Leiria, Portugal, June 28-July 1, 2011

Kolarevic, Branko; Architecture In The Digital Age Design And Manufacturing, Spon Press: New York, 2003.

Salazar, Jaime; Gausa, Manuel; Singular housing. El dominio privado, Barcelona, 1999.

Sass, L.; “Synthesis of design production with integrated digital fabrication”, 2007

Zucchi, Cino; Collina, Luisa; Sempering: Process and Pattern in Architecture and Design, Itália, 2016.

Cardoso, Cláudia; <http://repositoriodemateriais.pt>., acedido a Outubro 2018

FabLab, <http://www.fablabsportugal.pt>, acedido a Fevereiro 2018

Fabrico aditivo, <https://www.3dhubs.com/3d-printing>, acedido a Fevereiro 2018

Grasshopper, <http://www.grasshopper3d.com>, acedido a Fevereiro 2018

McNeel’s Rhinoceros, <http://www.rhino3d.com>, acedido a Fevereiro 2018

Movimento maker, <https://www.movimentomaker.pt>, acedido a Fevereiro 2018

Space 10; “Classical Through Digital”, <https://space10.io/classical-through-digital>, acedido a Março 2018

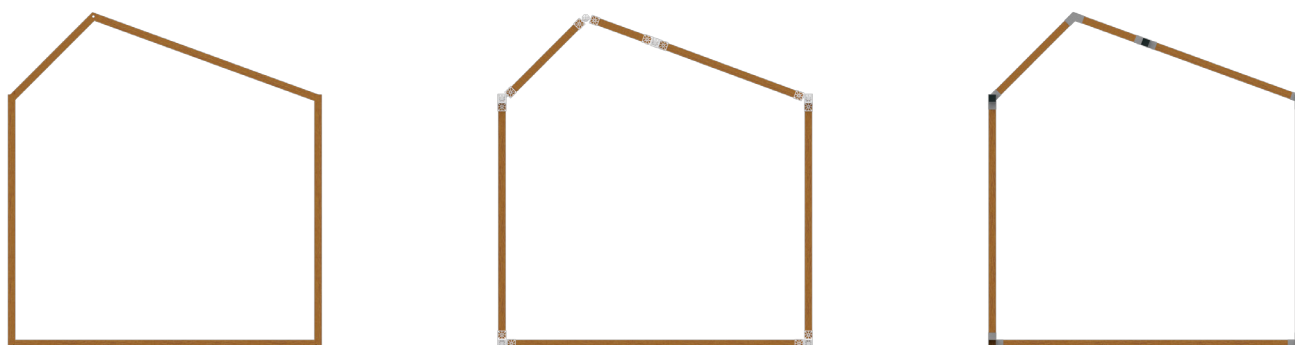
Studio Mieke Meijer, “Frameworks”, <https://miekemeijer.com/frameworks>, acedido a Março 2018

Studio Minale, “Keystones”, <https://www.minale-maeda.com/KEYSTONES>, acedido a Março 2018

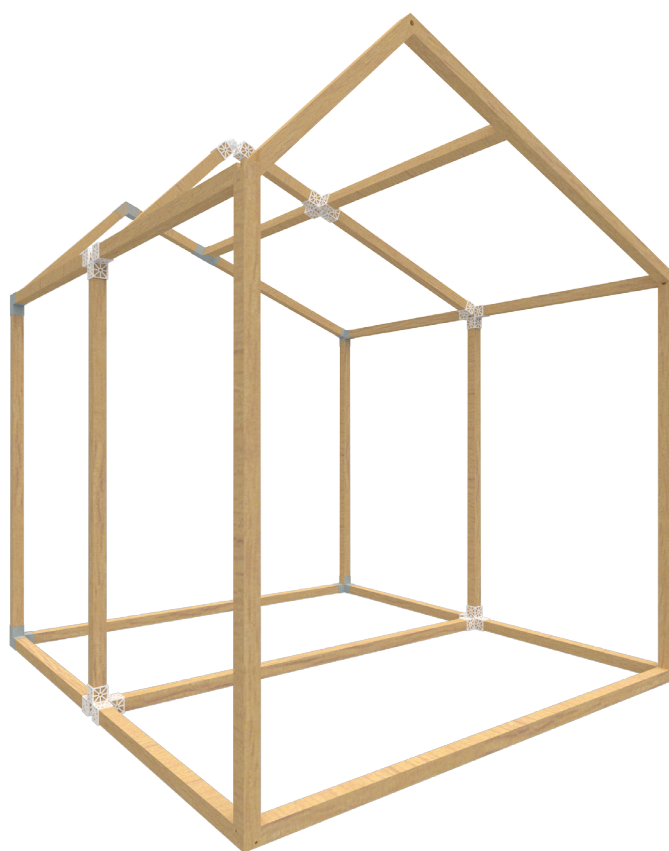
Wikihouse, <https://wikihouse.cc/>, acedido a Fevereiro 2018

## 7. Anexos

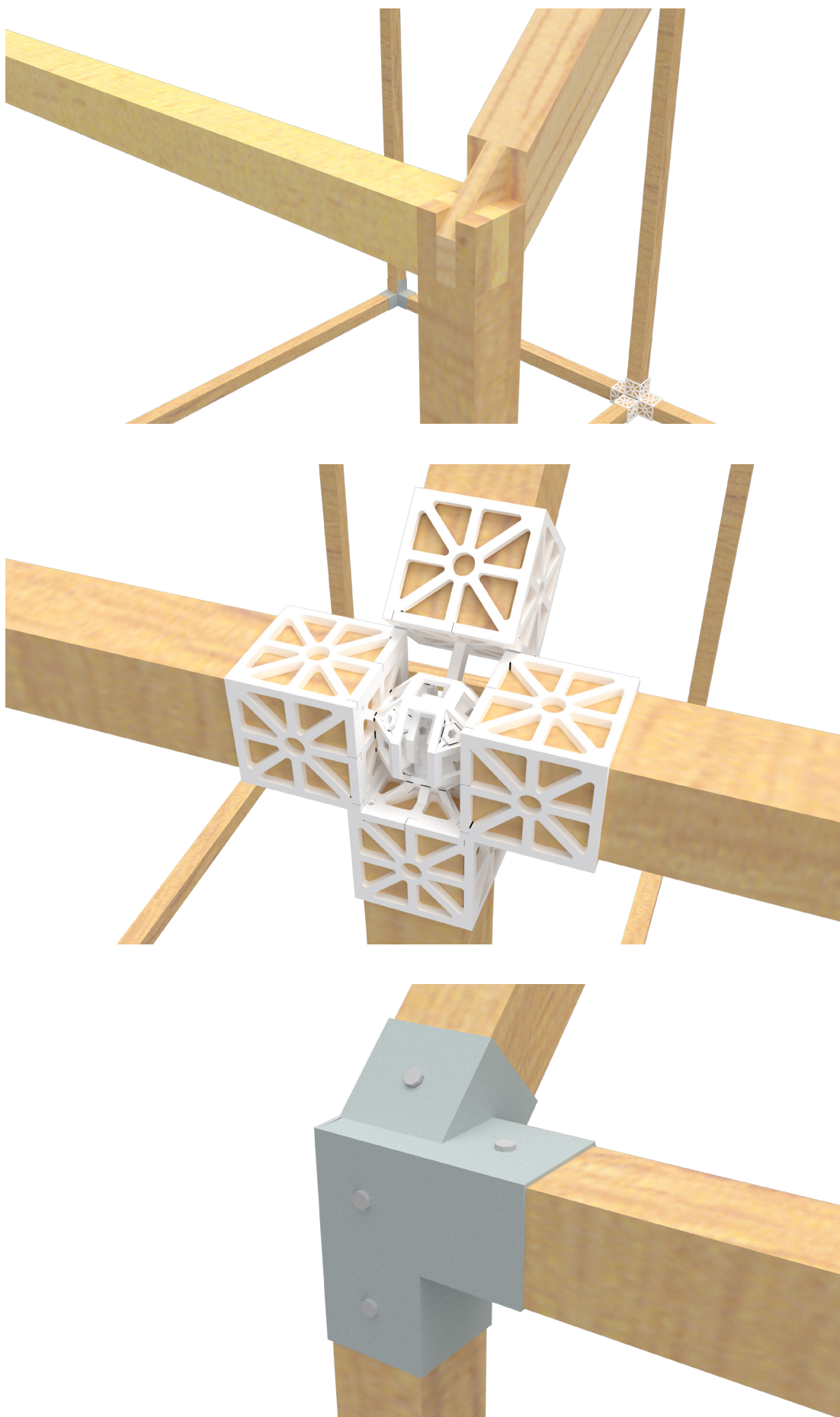




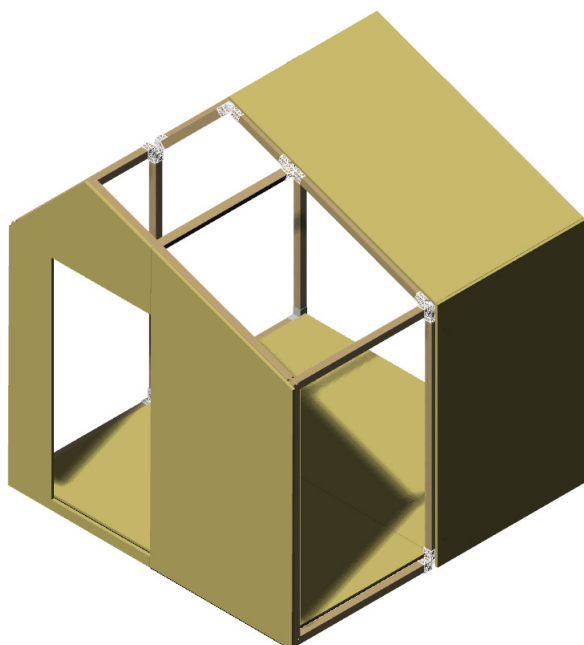
Anexo 1. Exposição dos três pórticos com as três ligações.



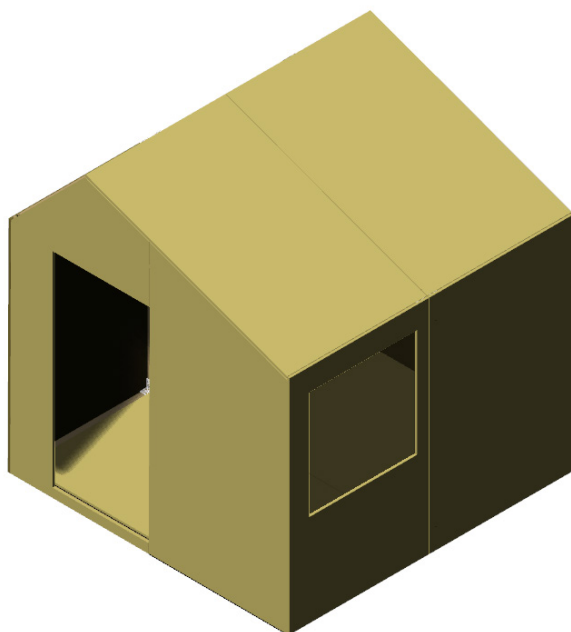
Anexo 2. Prespetiva do protótipo.



Anexo 3, 4 e 5. Ligação de madeira, ligação de plástico e ligação de metal, respetivamente.



Anexo 6. Prespetiva do protótipo, revestimento OSB incompleto.



Anexo 7. Prespetiva do protótipo, revestimento OSB.



